



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL ELEMENTO COMBUSTIBLE RECH-1 MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA CFD

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

EDISON BASTIÁN MANRÍQUEZ ALEGRÍA

PROFESOR GUÍA:

ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

WILLIAMS CALDERON MUÑOZ

CARLOS GUTIÉRREZ ULLOA

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico
POR: Edison Manríquez Alegría
FECHA: 25/11/16
PROFESOR GUÍA: Álvaro Valencia Musalem

CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL ELEMENTO COMBUSTIBLE RECH-1 MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA CFD

La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés) promueve el uso seguro y pacífico de la Energía Nuclear. La agencia funciona de manera cooperativa entre todos los Estados que la integran. Y en Chile la responsable es la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN).

En el país hay dos reactores de investigación, uno de ellos es el RECH-1, este corresponde a un reactor de investigación con una potencia de $5[MWt]$, es moderado y refrigerado con agua liviana y su combustible corresponde al tipo MTR (*Material Testing Reactor*) placas planas.

El elemento combustible utilizado en el RECH-1 es fabricado en la Planta de Elementos Combustibles (PEC), perteneciente a la CCHEN. El elemento combustible consiste en un prisma rectangular fabricado con aluminio, el cual posee un largo aproximado de 1 metro. Este se puede dividir en tres subconjuntos: Caja Filtro, por donde ingresa el agua; Cuerpo, en donde están las 16 placas combustibles; y la Boquilla, por donde sale el agua.

En el último protocolo de seguridad y buenas prácticas para reactores de investigación, la IAEA exige caracterizar hidráulicamente el comportamiento del elemento combustible, esto corresponde a determinar la pérdida de presión del refrigerante durante los procedimientos realizados en el reactor.

A partir de un estudio bibliográfico, se genera el capítulo de antecedentes, en cual se obtiene la información sobre el caudal nominal del RECH-1. La velocidad nominal en la entrada del elemento combustible corresponde a $0,349[m/s]$. Con la velocidad crítica de Miller y la información obtenida de los informes de la CCHEN, se selecciona el rango de velocidades $0,001-1,15[m/s]$ para el que se realizará la caracterización, considerando 10 velocidades distintas.

Las simulaciones han sido realizadas en el programa ANSYS Fluent 17.1, se simulan los subconjuntos y elemento combustible por separado para las distintas velocidades. El programa permite generar diagramas de distintos tipos y representar fenómenos físicos, los que ayudan en la comprensión del problema. Como resultados se obtienen las curvas de caída de presión del refrigerante en función de la velocidad, diagramas de contorno de diferencia de presión y líneas de corriente. Los resultados se comparan con medidas experimentales aportadas por la CCHEN, mostrando una diferencia mínima de un 6%. entre las presiones obtenidas. Con lo que se dan por cumplido los objetivos de la memoria.

Los que me conocen saben que yo manejo muy buen sentido del humor.

Yo he sido un hombre que me considero una persona feliz.

Siempre he estado contento, siempre he estado optimista, siempre he tenido fe en la vida.

Siempre canto en la ducha

Agradecimientos

Me gustaría comenzar expresando mi infinita alegría, satisfacción, orgullo y relaxo por haber concluido mis estudios universitarios. En este largo camino, han sido icónicas las personas que quiero agradecer. En primer lugar, me quiero nombrar a los personajes “anónimos”, esos que comúnmente no figuran en los créditos, quizás porque no son parte, directa, de la formación académica. Sin embargo, creo que la universidad entrega más que datos y formulas. Aquí es donde aparecen las auxiliares de mecánica “*Las tías*”, quienes se preocupan por nosotros, expresándolo en que nuestros espacios sean lo más amenos posibles, se toman el tiempo para conversar, compartir un desayuno. Las funcionarias de mecánica, ayudando en cuanto se posible en los quehaceres académicos; funcionarios de la facultad, en especial a Carmencita y al Guille, que fueron parte fundamental de mis actividades extraprogramáticas. A la Fundación Moisés Mellado. A las tías de Buen Pan y el Tío del Hare, que siempre me atendieron con una sonrisita y amabilidad, haciendo más ameno las largas y extenuantes jornadas de estudio. A Luchito Mono, por *agarrarme pal webeo* y hacerme reír; y así otras personas que son parte de la “*vida universitaria*”.

Ya en forma más íntima quiero agradecer a mi núcleo familiar por haberme dado el soporte emocional, alegría, grandes momentos, seguridad, un respaldo para terminar mis estudios. A las personas que se han transformado en mi familia y que han estado en los momentos más importantes presentes. sé que puedo contar incondicionalmente con todos ellos, que siempre apoyaran mis decisiones y aventuras, siempre mostrando sus recatos y preocupaciones, pero deseando lo mejor para mí.

La vida me ha conectado con amigos y amigas a los cuales quiero mucho. Partiendo por *El Bunker*, quienes desde pequeño me han mostrado que son un grupo muy apegado, siempre preocupados por el otro y entregándome grandes momentos de alegría, euforia, relaxo, amistad, etc.. En este contexto sería una falta de respeto no nombrar a PBP, un grupo solido en la recreación y dispersión universitaria.

A los amigos de mecánica Chino, FF17, Mirtan, Bruno, Vicente, Cubano, Pelao, Javier, Cosi, Mirko, Quinzacara, Angelo, y a los con quienes aprendí la disciplina que ejerceré de profesional, con quienes compartí en los trabajos las jornadas de estudios, en los trasnoches. A los integrantes del este lindo departamento, quiero expresar mis gracias por haber aportado en la formación profesional.

A los amigos de las cuecas Karen, Violchen, Mono, Sami, Caro, la Vecina y otros, con quienes tuve la oportunidad de adentrarme en esta linda cultura chilena, por haber compartido vinos, cervezas y tragos nacionales. Porque conocí lugares típicos con ellos y me apasiona este arte.

A la gente de Pedalea! Guti, Patrick, Cotito, Manana, Politis,, Cesar, Andrés, Alejandro, Vicente, Manuel, Pati,, Maxi. Con quienes pude compartir este pasatiempo, gestionar actividades, proyectos, ayudar a las personas, pedalear y compartir

A los amigos de la vida que hice en la época universitaria Yaya, Dana, Omar, Negro, Gita, la Jo, Sofi, Scarlette, Meli, Qwerty, la Vale (que llego al final de la U) que me han aportado un granito de arena en este trayecto, que me han dado un abrazo, una palmadita en la espalda, compartido cervezas, carretes, estudios, consejos, que me han prestado su hombro, o simplemente un minuto para conversar; sepan que los respeto, estimo y los quiero mucho. Y a todos los que no alcance a poner porque se me acaba la página, muchas gracias

Tabla de contenido

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Antecedentes generales | 1 |
| 1.2 | Motivación..... | 2 |
| 1.3 | Objetivos..... | 2 |
| 1.3.1 | Objetivo General..... | 2 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos..... | 2 |
| 1.4 | Alcances | 2 |
| 2 | Metodología | 3 |
| 3 | Antecedentes | 5 |
| 3.1 | Reactor Chileno Experimental 1 (RECH-1) | 5 |
| 3.2 | Elemento Combustible MTR 3,4 grU/cm ³ | 7 |
| 3.3 | Estudios Anteriores | 11 |
| 3.3.1 | Estudio Computacional | 11 |
| 3.3.2 | Medidas Experimentales: Loop Hidráulico | 13 |
| 3.4 | Estudios Similares..... | 15 |
| 3.5 | Mecánica de Fluidos | 18 |
| 3.5.1 | Viscosidad | 18 |
| 3.5.2 | Flujo Laminar Desarrollado | 20 |
| 3.5.3 | Flujo Incompresible | 20 |
| 3.5.4 | Pérdida de Presión en Placas Paralelas | 21 |
| 3.5.5 | Pérdida de Presión en Placas Perforadas | 21 |
| 3.5.6 | Pérdida de Presión en Boquilla | 26 |
| 3.5.7 | Pérdida de Presión por Obstáculos en Canal Confinado | 27 |
| 3.5.8 | Velocidad Crítica del Fluido | 28 |
| 3.6 | Mecánica de Fluidos Computacional..... | 29 |
| 3.6.1 | Ecuaciones Gobernantes | 29 |
| 3.6.2 | Método de Volúmenes Finitos | 30 |
| 3.6.3 | Acoplamiento de Presión y Velocidad | 31 |
| 3.6.4 | Mallado y Calidad..... | 31 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.6.5 | Skewness | 32 |
| 3.6.6 | Aspect Ratio..... | 33 |
| 4 | Resultados | 35 |
| 4.1 | Definición del Problema..... | 35 |
| 4.2 | Cálculo Analítico | 36 |
| 4.2.1 | Pérdida de Presión en la Caja Filtro | 36 |
| 4.2.2 | Pérdida de presión en el Cuerpo del elemento combustible | 37 |
| 4.2.3 | Pérdida de presión en la Boquilla | 38 |
| 4.2.4 | Pérdida de Presión en el Elemento Combustible | 38 |
| 4.3 | Geometría | 39 |
| 4.3.1 | Caja Filtro | 39 |
| 4.3.2 | Cuerpo | 41 |
| 4.3.3 | Boquilla | 42 |
| 4.3.4 | Elemento Combustible | 43 |
| 4.4 | Mallado | 43 |
| 4.4.1 | Mallado Caja Filtro | 44 |
| 4.4.2 | Mallado Cuerpo | 45 |
| 4.4.3 | Mallado Boquilla | 46 |
| 4.4.4 | Mallado Elemento Combustible | 49 |
| 4.5 | Comparación y Validación del Mallado | 52 |
| 4.5.1 | Método Skewness | 52 |
| 4.5.2 | Método Aspect Ratio | 55 |
| 4.6 | Configuración | 58 |
| 4.7 | Simplificación del Problema | 58 |
| 4.8 | Simulaciones | 59 |
| 4.9 | Validación..... | 60 |
| 4.10 | Resultados de Simulaciones | 60 |
| 4.11 | Resultados Analíticos | 60 |
| 4.12 | Resultados Simplificación | 61 |
| 4.13 | Resultados de la Simulación..... | 62 |
| 4.13.1 | Caja Filtro | 62 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.13.2 | Cuerpo | 62 |
| 4.13.3 | Boquilla | 65 |
| 4.13.4 | Elemento Combustible | 65 |
| 4.13.5 | Compendio de Resultados | 69 |
| 5 | Discusión, Análisis y Comparación de Resultados | 73 |
| 6 | Conclusiones | 75 |
| | Bibliografía | 77 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Diagrama de flujo con los pasos para completar el trabajo de título. | 3 |
| Figura 3.1 Esquema de la piscina de un reactor de investigación, este se muestran los principales componentes del reactor..... | 5 |
| Figura 3.3 Vista en corte del edificio del RECH-1, donde se aprecia la profundidad de la piscina y la ubicación del núcleo..... | 6 |
| Figura 3.4 Núcleo del RECH-1, se muestra la disposición de los elementos que van insertos en el arreglo. | 7 |
| Figura 3.5 Isométrico del EC MTR 3,4 grU/cm ³ | 7 |
| Figura 3.6 Se muestra en detalle las piezas que conforman la caja filtro.. | 8 |
| Figura 3.7 Se muestra en detalle las piezas que conforman el cuerpo..... | 9 |
| Figura 3.8 Se muestra la Boquilla y el detalle de ella.. | 10 |
| Figura 3.9 Caída de presión en el elemento combustible. | 12 |
| Figura 3.10 en a) se muestra la zona de prueba del Loop-Hidráulico y en b) se muestra el montaje completo del Loop-Hidráulico..... | 13 |
| Figura 3.11 Gráfico de la diferencia de presión en función de la variación de caudal. | 14 |
| Figura 3.12 Elemento combustible del MNR,. | 15 |
| Figura 3.13 Comportamiento del flujo a medida que avanza en el elemento combustible. | 16 |
| Figura 3.14 Gráfico que presenta la pérdida de presión en función de la variación del flujo másico a través del elemento combustible. | 17 |
| Figura 3.15 Flujo alrededor de una esfera: a) flujo no viscoso, b) flujo real. | 19 |
| Figura 3.16 Flujo a través de placas paralelas. | 21 |
| Figura 3.17 Placas perforadas, en a) se tiene una placa para instalar en cañerías para controlar el flujo y su presión, en b) se tiene una placa para instalar en un ducto de aire para filtrar partículas. | 22 |
| Figura 3.18 Se tiene una instalación de un túnel de viento con una placa perforada en su centro. | 22 |
| Figura 3.19 Líneas de flujo a través de una placa perforada, generadas en un programa computacional. .. | 23 |
| Figura 3.20 Coeficiente de pérdida en función de la porosidad y td ,..... | 26 |
| Figura 3.21 Contracción gradual -boquilla- y los parámetros que la determinan. | 27 |
| Figura 3.22 Diagrama que muestra flujo en canal confinado obstaculizado por dos bloques cuadrados... .. | 27 |
| Figura 3.23 Pandeo de las placas paralelas. | 28 |
| Figura 3.24 Tipos de elementos finitos. | 32 |
| Figura 3.25 Comparación de la celda creada contra celda optima en el método skewness. | 32 |
| Figura 3.26 Rangos de tolerancia de calidad de malla para los valores de skewness. | 33 |
| Figura 3.27 Relación de aspecto para cuadrados y triángulos. | 33 |
| Figura 4.1 Bosquejo del elemento combustible en corto, con las condiciones de entrada y salida..... | 36 |
| Figura 4.2 Geometría del elemento combustible creada con el programa computacional. | 39 |
| Figura 4.3 Se muestra el negativo generado a partir de la Caja Filtro, vistas en corte y detalles..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4 Vista parcial de la geometría formada por el fluido en el Cuerpo y vista en corte de la sección interior. Fuente: elaboración propia | 41 |
| Figura 4.5 Se muestra el vaciado de la Boquilla y una vista en corte. | 42 |
| Figura 4.6 Negativo del elemento combustible completo y el detalle de los cambios de sección entre sus subconjuntos..... | 43 |
| Figura 4.7 Malla creada en el subconjunto de la Caja Filtro, se muestran el cuerpo completo, vista en corte de la palca filtro, salida del fluido y detalle del travesaño..... | 44 |
| Figura 4.8 Método de mallado que se realiza en el Cuerpo..... | 45 |
| Figura 4.9 Malla creada en el Cuerpo, se muestra la vista de la geometría completa, detalle de la pared de las placas combustibles y la vista en corte del interior del volumen. | 46 |
| Figura 4.10 Método "inflation" utilizado en la Boquilla y sus resultados..... | 47 |
| Figura 4.11 La malla creada en la Boquilla, se muestra el volumen completa, la vista de la entrada y la salida del flujo. | 48 |
| Figura 4.12 Mallado del elemento combustible, se muestra el volumen de control completo.. | 50 |
| Figura 4.13 Detalles del mallado del elemento combustibles..... | 51 |
| Figura 4.14 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla de la Caja Filtro, según el método Skewness..... | 53 |
| Figura 4.15 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla de la Cuerpo, según el método Skewness..... | 54 |
| Figura 4.16 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla de la Boquilla, según el método Skewness..... | 54 |
| Figura 4.17 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla del elemento combustible, según el método Skewness..... | 55 |
| Figura 4.18 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla del Caja Filtro, según el método Aspect Ratio..... | 56 |
| Figura 4.19 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla del Cuerpo, según el método Aspect Ratio..... | 56 |
| Figura 4.20 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla del Boquilla, según el método Aspect Ratio..... | 57 |
| Figura 4.21 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla del elemento combustible, según el método Aspect Ratio..... | 57 |
| Figura 4.22 Geometrías simplificadas de la Boquillas..... | 59 |
| Figura 4.23 Líneas de corriente a través de las geometrías de estudio..... | 61 |
| Figura 4.24 Distintos resultados para la velocidad nominal la Caja Filtro.. | 63 |
| Figura 4.25 Distintos resultados para la velocidad nominal en el Cuerpo. | 64 |
| Figura 4.26 Distintos resultados para la velocidad nominal en la Boquilla..... | 66 |
| Figura 4.27 Distintos resultados globales para la velocidad nominal en el elemento combustible..... | 67 |
| Figura 4.28 Líneas de corriente en las distintas secciones del elemento combustible para la velocidad nominal..... | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.29 Diagrama de la curva de pérdida de presión en el elemento combustible para diferentes velocidades del refrigerante, mediante los distintos procedimientos..... | 71 |
| Figura 4.30 Diagrama del desglose de la pérdida de presión en cada subconjunto para las distintas velocidades, mediante los distintos procedimientos.. | 72 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1 Condiciones iniciales del problema..... | 11 |
| Tabla 3.2 Resultados de la caída de presión en el elemento combustible | 12 |
| Tabla 3.3 Velocidades utilizados para mediar la pérdida de carga en el elemento combustible del RECH-1 | 14 |
| Tabla 3.4 Cambio de viscosidad según el cambio de temperatura..... | 19 |
| Tabla 3.5 Variación de τ con tdh | 24 |
| Tabla 3.6 Variación kf con la porosidad y el número de Reynolds en el orificio | 25 |
| Tabla 3.7 Variación de ε con el número de Reynolds en orificio | 25 |
| Tabla 4.1 Número de Reynolds para las distintas velocidades | 35 |
| Tabla 4.2 Datos relevantes sobre la malla de los subconjuntos y el elemento combustible | 52 |
| Tabla 4.3 Rango de velocidades a evaluar. | 58 |
| Tabla 4.4 Resultados de la pérdida de presión mediante cálculo analítico | 60 |
| Tabla 4.5 Diferencia de presión para las distintas geometrías en la Boquilla | 61 |
| Tabla 4.6 Resultados globales de las simulaciones Computacionales | 69 |
| Tabla 4.7 Resumen comparativo de los distintos resultados y antecedentes..... | 70 |
| Tabla 4.8 Comparaciones de velocidades computacionales y datos experimentales. | 70 |

1 Introducción

1.1 Antecedentes generales

El avance tecnológico en el área de la Ingeniería Nuclear se ha focalizado en aumentar sus protocolos de seguridad en el funcionamiento de los reactores nucleares. En particular, la rama de reactores experimentales y sus centros de investigación asociados se han alineado con las políticas de seguridad de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) [1]. Las que se traducen en estudios termohidráulicos para caracterizar por completo el comportamiento del reactor en estado de funcionamiento normal y en caso de accidentes. Se busca determinar la tasa de refrigeración suficiente para eliminar el calor generado por el núcleo del reactor en cada fisión atómica, y así, evitar el fallo del combustible. Por lo tanto, los elementos combustibles utilizados en los reactores nucleares se diseñan para tener una geometría que favorezca la transferencia de calor y mantenga la condición de flujo de calor crítico para evitar el desgaste del combustible. El núcleo se encuentra sumergido en la piscina que contiene el refrigerante, el cual fluye a través de los canales del elemento combustible extrayendo el calor y manteniendo la temperatura superficial del combustible por debajo de los límites de seguridad.

A pesar de la cantidad de reactores experimentales (244 activos) existentes en el mundo, el número de estudios termo-hidráulicos registrados son pocos y son menos los estudios computacionales de fluidodinámica realizados a los elementos combustibles. La mayoría de los documentos existentes son de carácter confidencial. En el caso del RECH-1 se han realizado pruebas experimentales de pérdida de presión en una bancada de prueba y un estudio realizado en el programa CFX, sin embargo, en estos no se muestra la evolución del fluido dentro del elemento combustible. Dentro del trabajo que se realizará en la presente memoria, se estudiará la variación de caudal del fluido refrigerante para simular distintas condiciones de operación, obteniendo la curva que muestra el comportamiento de la presión a medida que aumenta la velocidad del refrigerante.

Los reactores de investigación abarcan una amplia variedad de reactores nucleares gubernamentales y comerciales que, en general, no se utilizan para la generación de energía eléctrica. El término “investigación” también incluye a los reactores de pruebas de materiales y entrenamiento. El propósito principal de los reactores de investigación es proporcionar una fuente de neutrones para la investigación, producción de radioisótopos para la medicina y otros fines industriales. El producto (haces de neutrones) puede tener características diferentes dependiendo del objetivo.

El RECH-1 corresponde a un diseño basado en el reactor HERALD perteneciente al United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), con una potencia de $5[MWt]$, es moderado y refrigerado con agua liviana desmineralizada-desionizada y su combustible es del tipo MTR (*Material Testing Reactor*). La piscina principal tiene como misión extraer el calor generado por el núcleo mediante circulación forzada del agua a través de los canales que quedan entre los elementos combustible. El reactor posee 34 elementos combustibles, el objetivo de cada uno de estos es aportar el material fisionable necesario para mantener las reacciones de fisión.

El elemento combustible del RECH-1 consiste en una caja de aluminio de sección cuadrada con una boquilla cilíndrica en su extremo inferior y una caja filtro en el extremo superior, el cuerpo del elemento está formado por 16 placas de combustibles planas y paralelas, 14 interiores y 2 exteriores. Su longitud es 985 mm y su sección transversal es de $74 \times 74\text{ mm}^2$. En régimen de

funcionamiento normal existe un flujo de $654 \text{ m}^3/\text{hr}$ que atraviesa el núcleo, lo que se traduce en una velocidad del fluido de $0,349 \text{ m/s}$ que entra a cada elemento combustible.

Se utilizará el software ANSYS con su módulo Fluent, el cual permite realizar simulaciones de fluido-dinámica computacional con distintas condiciones de funcionamiento para determinar las distintas variables físicas del fluido a medida que avanza en el elemento combustible y cómo se comporta con la variación de velocidad.

1.2 Motivación

La Planta de Elementos Combustible(PEC) de la CCHEN, actualmente, carece de capacidad de diseño hidráulico de elementos combustibles para reactores de investigación en el área de tecnología nuclear. Históricamente se han dedicado a la construcción de elementos combustibles en base al plano de fabricación. Sin embargo, nunca han realizado la caracterización hidráulica del elemento construido, según lo exige la IAEA.

La motivación de la presente memoria corresponde a realizar el estudio del comportamiento del fluido refrigerante al circular a través del elemento combustible, supliendo la carencia que posee la PEC

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo general corresponde a caracterizar hidráulicamente del elemento combustible para reactores de investigación al área de tecnología nuclear.

1.3.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos corresponden a:

- Determinar pérdida de presión en el elemento combustible nuclear del reactor RECH-1 entre el rango de velocidades $0,01-1,15[\text{m/s}]$.
- Determinar pérdida de presión mediante un cálculo analítico entre el rango de velocidades $0,01-1,15[\text{m/s}]$.
- Estudiar las líneas de corriente y el comportamiento del refrigerante en el interior del elemento combustible para el rango establecido.
- Comparar resultados computaciones con respecto a datos experimentales.

1.4 Alcances

El alcance de la presente memoria corresponde al estudio del elemento combustible tipo MTR placas planas de $3,4[\text{gU}/\text{cm}^3]$ utilizado por el RECH-1. La presente memoria se apega a las condiciones normales de operación del reactor. Se estudiará computacionalmente el comportamiento hidráulico para un rango acotado de velocidades y un número fijo de ellas (10). Sin efectuar modificaciones al elemento combustible y con un flujo laminar desarrollado del fluido.

2 Metodología

En la Figura 2.1 se muestra el esquema que resume la metodología para abordar el problema planteado, se opta por una estrategia secuencial, donde cada una los pasos es necesario para obtener los resultados y cumplir los objetivos. Parte con una revisión bibliográfica enfocada en la Mecánica de Fluidos aplicadas a la geometría a trabajar y a las condiciones que gobiernan el problema; una vez que se realiza dicho paso, se procede a un cálculo analítico para estimar la magnitud de los resultados; luego se comienza con el trabajo computacional, generando las geometrías que recibe ANSYS, se cumple esta etapa y se procede a crear la malla, la cual posteriormente se valida. Con la malla lista, se procede a configurar Fluent y se estudia simplificación del problema mediante simetría geométrica. Una vez determinada la etapa anterior, se procede a realizar las simulaciones de las distintas velocidades a calcular. Finalmente se analizan los resultados mediante comparación.



Figura 2.1 Diagrama de flujo con los pasos para completar el trabajo de título. Fuente: elaboración propia.

3 Antecedentes

3.1 Reactor Chileno Experimental 1 (RECH-1)

El reactor RECH-1 es un reactor nuclear de investigación tipo piscina de una potencia térmica de $5[MWt]$, el cual utiliza agua liviana como blindaje, moderador y refrigerante. utiliza barras de Berilio como reflectores. La estructura del reactor se muestra en la Figura 3.1, la cual corresponde a un reactor ingles de las mismas características que el RECH-1. El edificio del reactor aloja dos piscinas comunicadas por un canal, las piscinas corresponden a:

- Piscina principal: esta aloja en su fondo el núcleo del reactor y los tubos de haces.
- Piscina secundaria: esta posee en el centro de su base el difusor por donde retorna el agua del circuito primario después de su paso por el intercambiador de calor.

La superficie de las dos piscinas es de $25 m^2$ y su profundidad de $10,5 [m]$, estando el nivel normal de agua a $10[m]$ del fondo, por lo que el volumen total de la piscina son $250 [m^3]$ [2].

Una estructura de acero en voladizo (puente de desplazamiento) sobre el núcleo del reactor soporta el sistema de control. A través de este se puede manipular los distintos elementos que componen el núcleo.

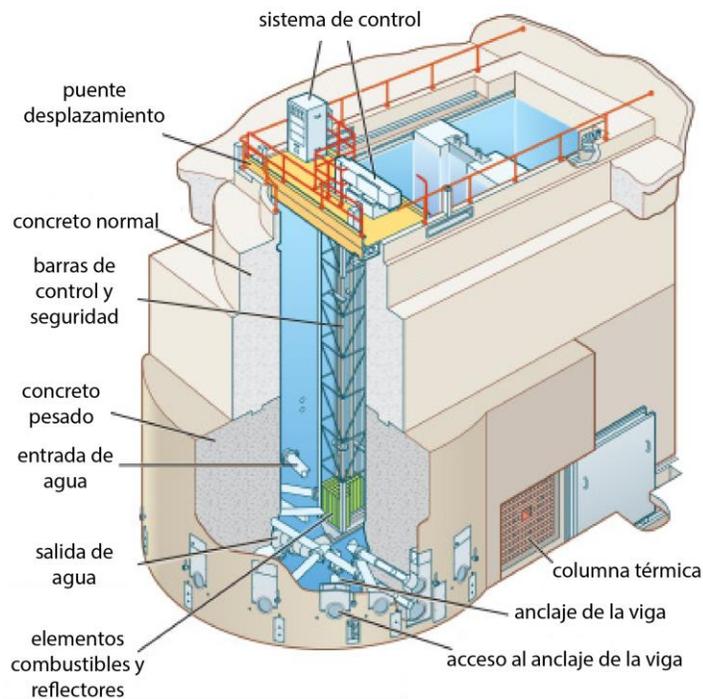


Figura 3.1 Esquema de la piscina de un reactor de investigación, este se muestran los principales componentes del reactor. Fuente:

[3]

El agua de la piscina circula a través del núcleo pasando hacia el tanque de decaimiento, como se aprecia en la Figura 3.2, en estado de funcionamiento normal posee un caudal de $654[m^3/hr]$ que circula a través del núcleo.

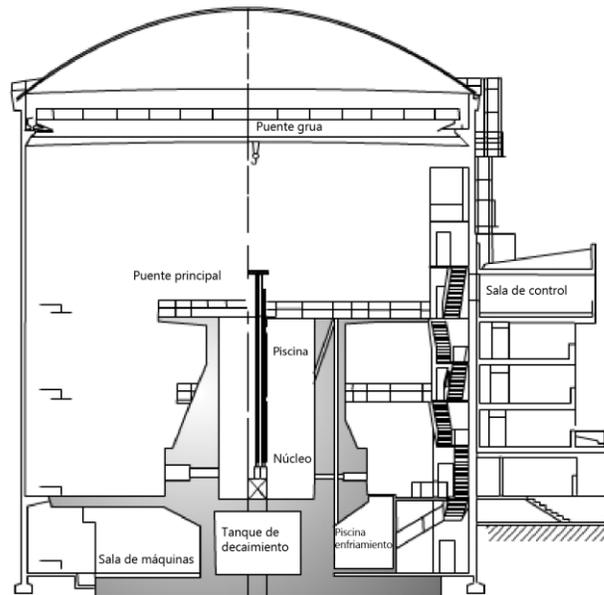


Figura 3.2 Vista en corte del edificio del RECH-1, donde se aprecia la profundidad de la piscina y la ubicación del núcleo.

Fuente [2]

El núcleo está inserto en una grilla de aluminio de 80 espacios, en la cual se ubican los diferentes tipos de elementos que forma el núcleo: elementos combustibles, elementos reflectores de berilio, elementos de aluminio sólido, elementos de obturación, terminales del sistema neumático y posiciones de irradiación. Todos los elementos son dispuestos en la grilla como se aprecia en la Figura 3.3.

Los 80 espacios de la grilla corresponden a una geometría cuadrada, cuyo lado mide $76,2 [mm]$. La circulación del refrigerante equivale a un caudal de $654[m^3/hr]$ [2], que según la IAEA [1] se divide en cada uno de los 80 canales que posee el núcleo, el IPEN (*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*) realizó un estudio para corroborar dicha aproximación, obteniendo como resultado que la diferencia entre el máximo y mínimo caudal en los distintos canales corresponde a un 4% [4]. Con lo anterior se obtiene que por cada canal del núcleo fluye un caudal de $8,18[m^3/hr]$, se transforma a unidades del sistema internacional $0,002[m^3/s]$. Se calcula la velocidad en cada cuadrante a partir de la relación

$$V = \frac{Q}{A} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3.1)$$

Donde

Q : caudal $[m^3/s]$

A : área $[m^2]$

Se obtiene una velocidad de $0,349[m/s]$ a través de cada sección cuadrada de $76,2 [mm]$.

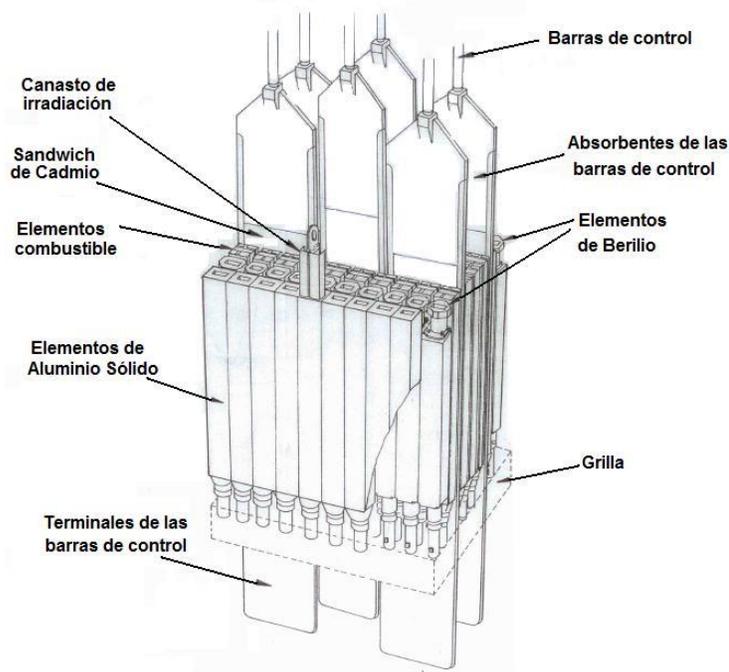


Figura 3.3 Núcleo del RECH-1, se muestra la disposición de los elementos que van insertos en el arreglo. Fuente [2].

3.2 Elemento Combustible MTR 3,4 grU/cm³

El elemento combustible construido en la PEC, se aprecia en la Figura 3.4 , este posee dimensiones generales que se pueden aproximar a un prisma rectangular de 954 mm x 74mm x72 mm. El conjunto se separa en tres grandes subconjuntos que se aprecian en la Figura 3.4, los cuales son:

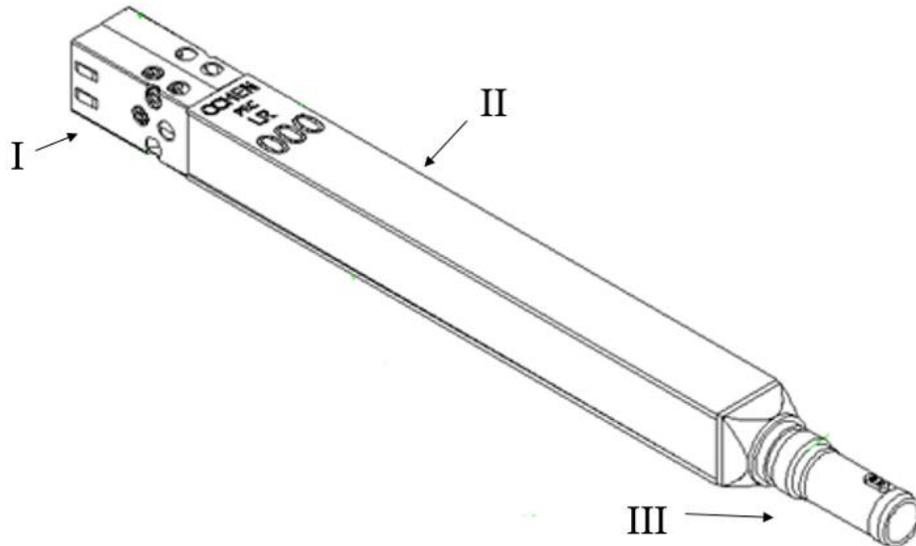


Figura 3.4 Isométrico del EC MTR 3,4 grU/cm³ Fuente: [2].

- I. Caja Filtro: consiste en el subconjunto que se encuentra en la parte superior del elemento combustible, como se muestra en la Figura 3.5 en a) se tiene la vista isométrica de la caja filtro y de las piezas que la componen, en esta no se logra apreciar la placa filtro. Sin embargo, en b) se muestra la caja filtro sin una de las carcasas y se aprecia la existencia de la placa filtro. Las dimensiones de la caja filtro corresponden a un alto de 143 mm y sección cuadrada de $74,7 \times 74,7\text{ mm}^2$. Los travesaños o puentes permiten manipular el elemento combustible mediante una pértiga, su geometría se muestra en c) y sus medidas se pueden aproximar a un prisma rectangular de ancho 10 mm , largo 68 mm y alto 25 mm ; además, viene adosada la pieza de orientación que sirve de guía en instalación del elemento combustible en el núcleo. La placa filtro posee las dimensiones de $67\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ con 2 mm de espesor, como se aprecia en d), posee aproximadamente 103 perforaciones de con un diámetro de $4,6\text{ mm}$ lo que se traduce en área abierta de $0,0017\text{ m}^2$.

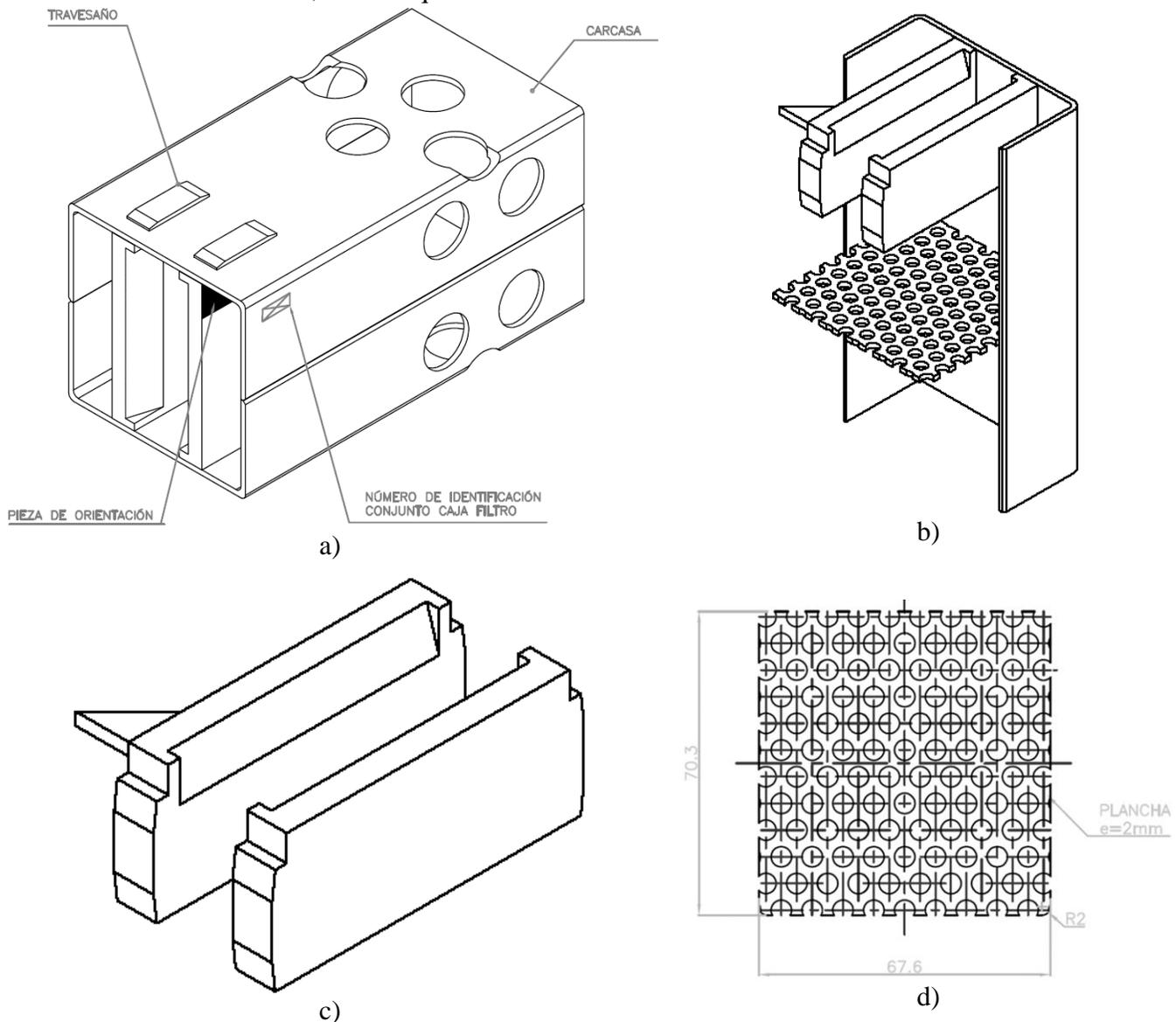
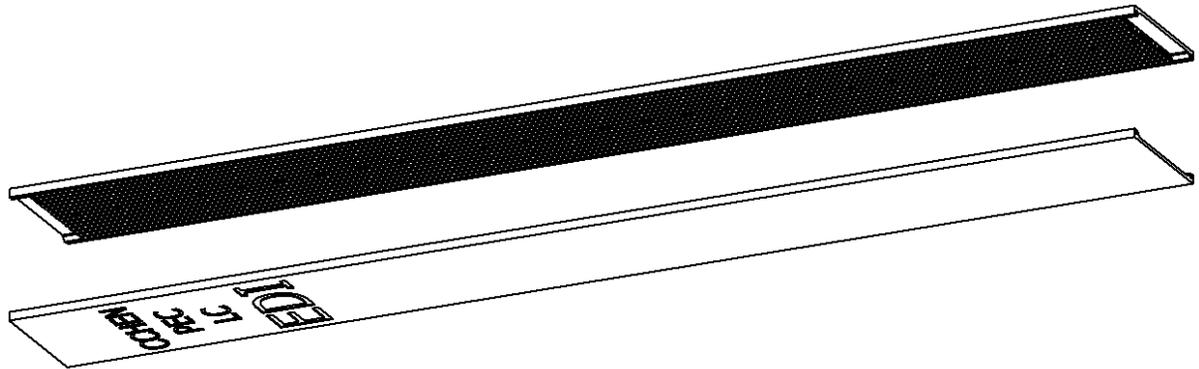
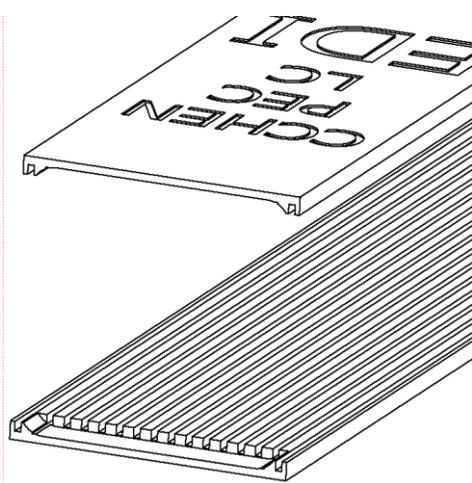


Figura 3.5 Se muestra en detalle las piezas que conforman la caja filtro. Fuente: [2].

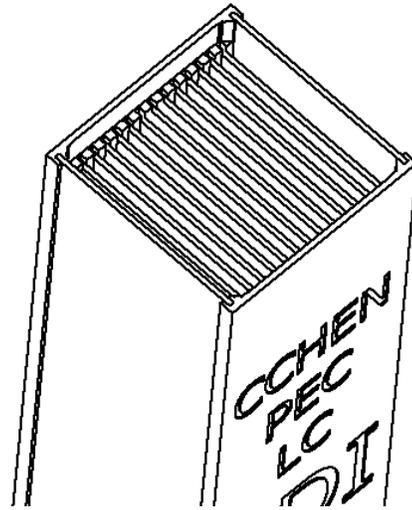
- II. Cuerpo: este subconjunto corresponde al más importante del reactor, puesto que en él se encuentra el contenido de uranio que aporta el material fisible para hacer funcionar el reactor. Las piezas que lo componen se aprecian en la Figura 3.6, en a) se muestran las 2 placas soportes que tiene una longitud de 650mm y ancho de $74,7\text{mm}$, en b) se muestra un acercamiento de las placas soportes en donde se aprecia las ranuras cuyo espesor es $1,7\text{mm}$ y profundidad de 2.5mm , son 16 ranuras que reciben las placas combustibles que se muestran en c), estas son 14 placas internas con un largo de 625mm y 2 placas externas con un largo de 650mm , ambas poseen un espesor de 1.53mm y un ancho de 69.8mm . En d) se muestra el ensamble de las piezas, dicha geometría corresponde al punto donde conecta el cuerpo con la caja filtro.



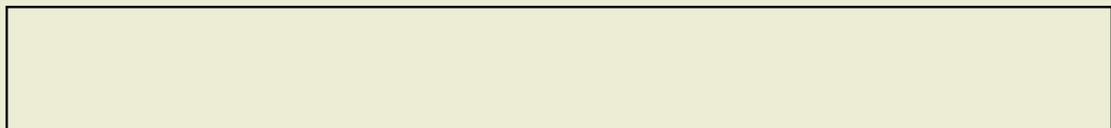
a)



b)



d)



c)

Figura 3.6 Se muestra en detalle las piezas que conforman el cuerpo. Fuente: [2].

III. Boquilla: este subconjunto corresponde al final del elemento combustible y va inserta en la grilla. La geometría se muestra en la Figura 3.7, en a) se presenta la Boquilla completa donde se aprecia la geometría exterior, la cual interactúa con la grilla, posee una chaveta que asiste en la instalación del elemento combustible en el núcleo. En b) se muestra el interior de la Boquilla, que corresponde a la vía de circulación del agua, además se aprecia el cambio de sección en la geometría. En c) se muestran las medidas de la pieza, posee un largo de 192mm , un diámetro de entrada de $70,6\text{mm}$ y diámetro de salida de 38mm , además se aprecia que existen dos cambios de sección que en su interior.

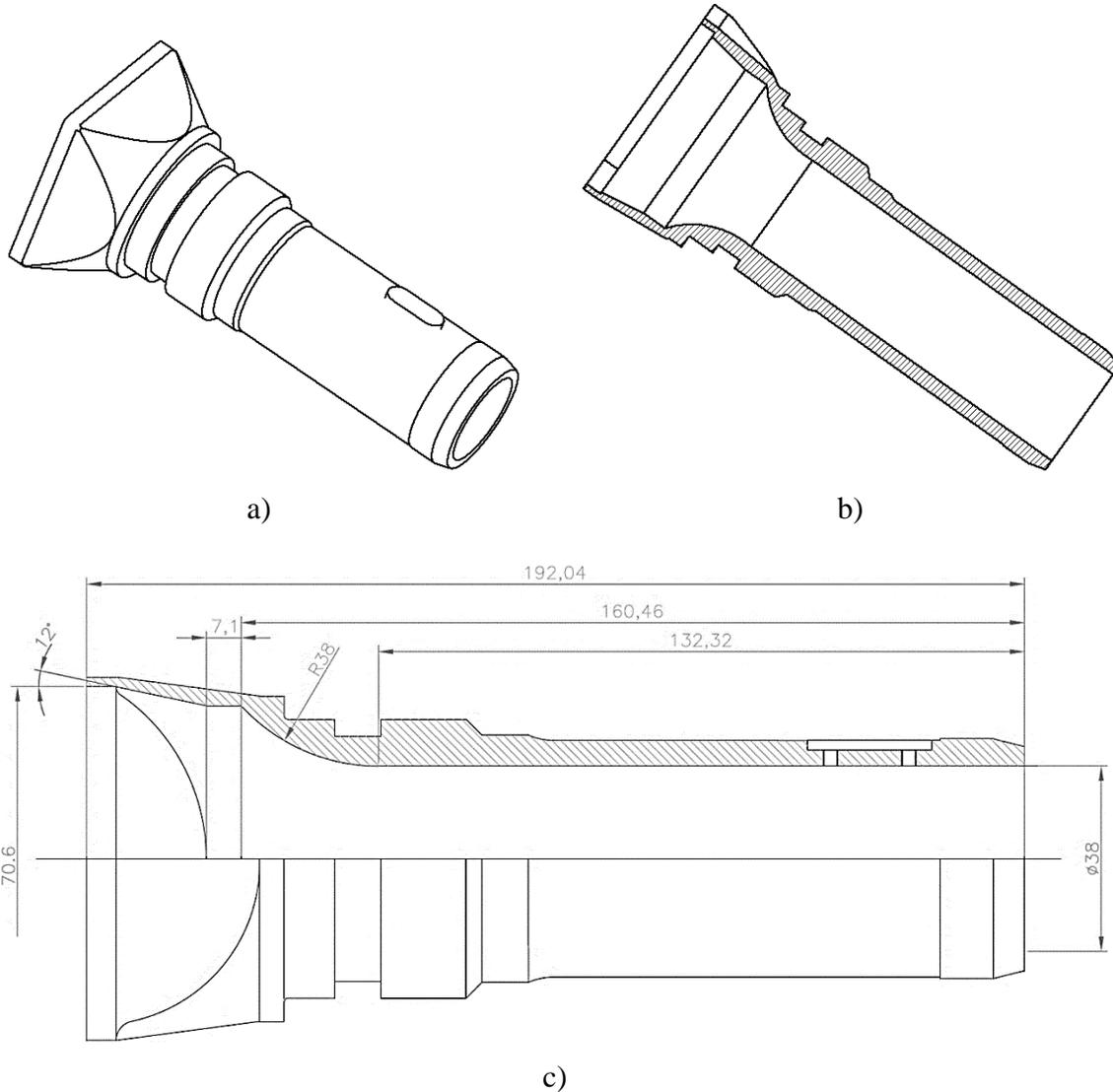


Figura 3.7 Se muestra la Boquilla y el detalle de ella. Fuente: [2].

3.3 Estudios Anteriores

Dentro de la CCHEN se han realizados estudios previos sobre el elemento combustible, de los cuales se presentarán los datos relevantes para la presente memoria:

3.3.1 Estudio Computacional

Existe un estudio previo realizado por un memorista de la Universidad de Magallanes en conjunto con la CCHEN que genera una caracterización termohidráulica detallada [5], en este se utiliza el programa ANSYS-CFX versión 13 y se ocupan las condiciones operacionales que se muestran en la Tabla 3.1, para realizar la caracterización.

Tabla 3.1 Condiciones iniciales del problema

| | |
|--|----------------------|
| Caudal de refrigeración del núcleo:(Q_b) | 654 [m^3/hr] |
| Caudal considerando 97% pasando por los EC:(Q_N) | 634 [m^3/hr] |
| Temperatura refrigerante entrada núcleo:(T_E) | 35 [$^{\circ}C$] |
| Velocidad del refrigerante en el núcleo: (V) | 1,78 [m/s] |
| Caudal de refrigerante del canal caliente:(Q_{CC}) | 0,000367 [m^3/s] |
| Número de Reynolds:(Re) | 23.844 |
| Presión hidrostática entrada elemento combustible | 165.045 [Pa] |
| Flujo másico de salida del elemento combustible | 5,296 [Kg/s] |
| Caída de presión en el núcleo nominal | 14.709 [Pa] |

Fuente [5]

Con los datos expuestos, se obtuvo la caída de presión que se muestran en la Tabla 3.2. En la Figura 3.8 se muestra un diagrama de contorno en un plano que pasa a través de un canal del elemento combustible, en el diagrama se aprecia cómo se distribuye la caída de presión en el elemento combustible. También, se evidencia que la mayor caída de presión ocurre en la placa filtro para luego caer de manera gradual en los canales de refrigeración y, finalmente, en la Boquilla ocurre la última caída súbita de presión. Los resultados computacionales presentan un 9,39% de error con respecto a los cálculos analíticos y un 13,5% del valor de caída de presión teórico.

Tabla 3.2 Resultados de la caída de presión en el elemento combustible

| | |
|---|------------|
| Caída de presión calculada | 17902 [Pa] |
| Caída de presión teórica | 17259 [Pa] |
| Caída de presión simulación computacional | 19583 [Pa] |

Fuente [5]

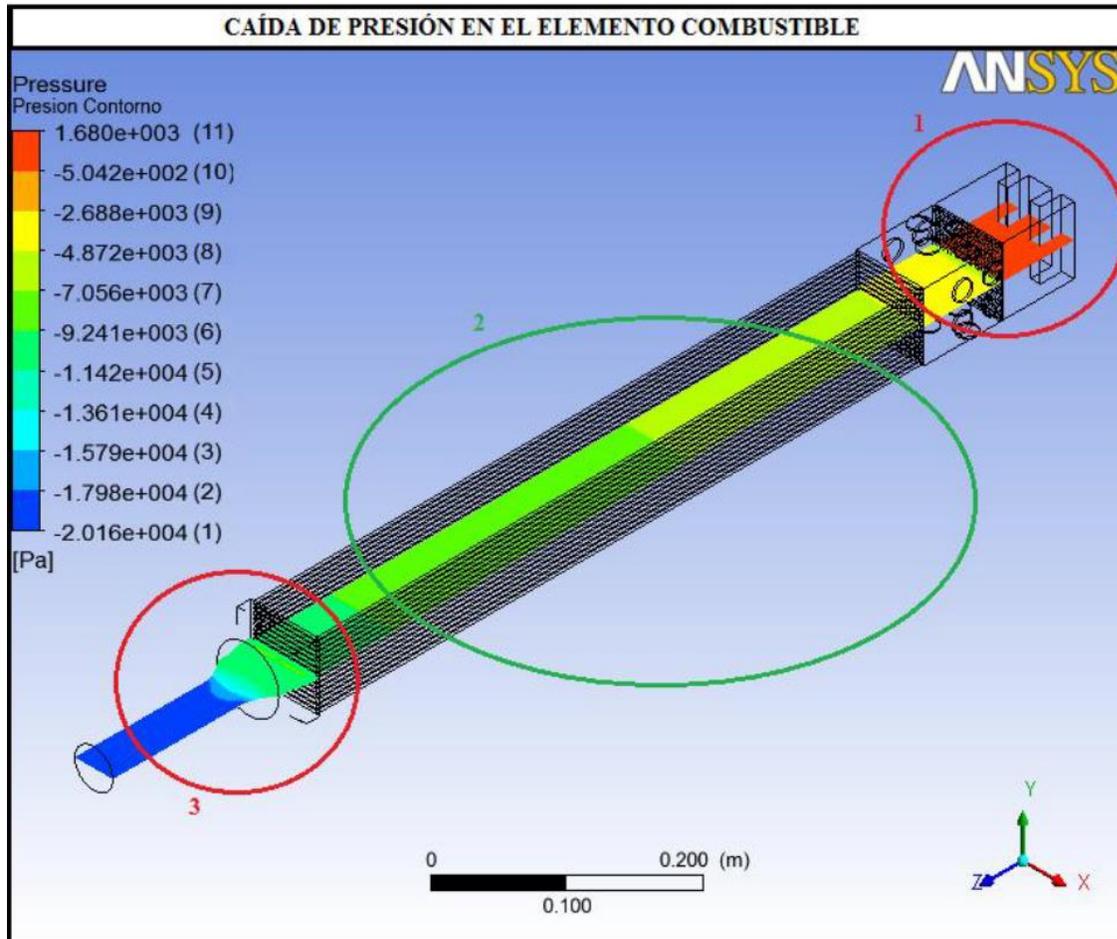


Figura 3.8 Caída de presión en el elemento combustible. Fuente [5]

3.3.2 Medidas Experimentales: Loop Hidráulico

El Loop Hidráulico se construyó en las instalaciones de la PEC y corresponde a la bancada de prueba para obtener las medidas experimentales de pérdida de presión en el elemento combustible. El elemento combustible se ubica en la zona de prueba, como se muestra en a) de la Figura 3.9. Posee una bomba de agua con flujo reversible y variación de caudal, como se aprecia en b), por lo que se pueden tomar muestras a distintos caudales. Para tomar las medidas posee transductores de presión en la zona A y B de la zona de prueba. La instalación utiliza agua desmineralizada a temperatura ambiente 20°C , teniendo una densidad de $998[\text{kg}/\text{m}^3]$ [6].

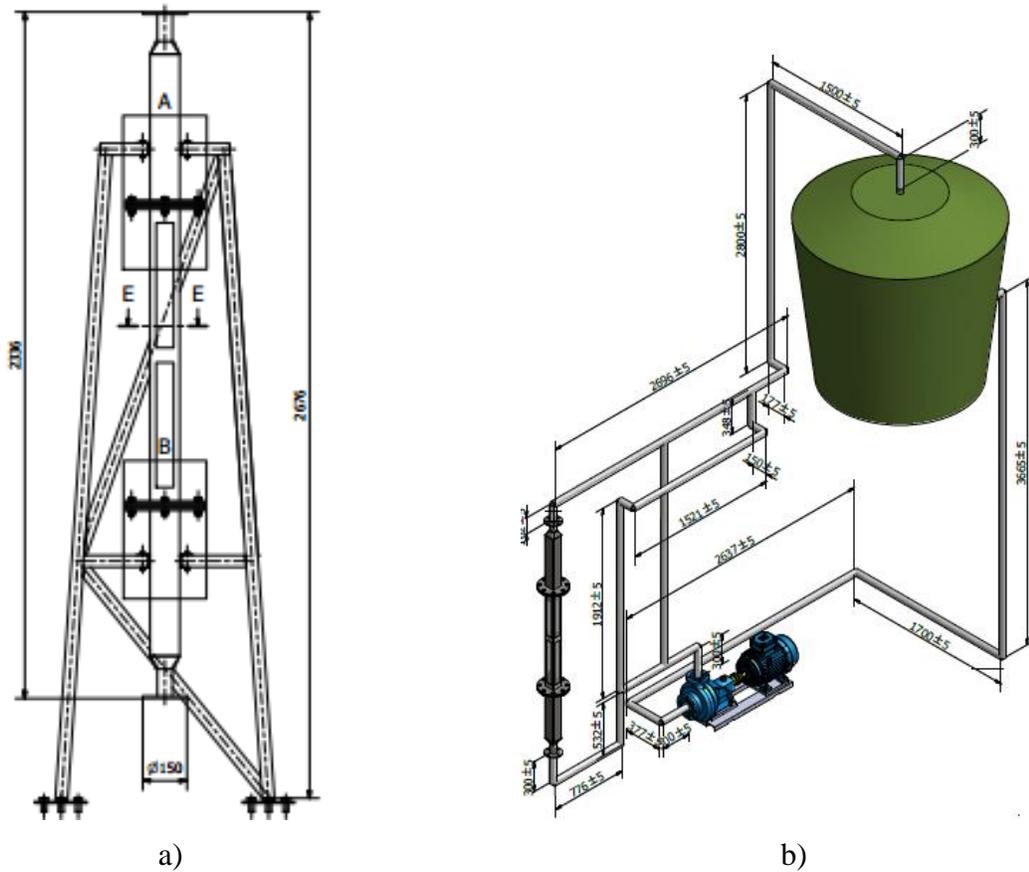


Figura 3.9 en a) se muestra la zona de prueba del Loop-Hidráulico y en b) se muestra el montaje completo del Loop-Hidráulico.

Fuente [6]

Mediante las mediciones experimentales se obtiene la caída de presión para la variación de velocidad, que se muestran en la Tabla 3.3, en donde se aprecia que se toman dos mediciones según se varía la frecuencia de la bomba que maneja el caudal del sistema y se expone una tercera columna "Promedio" que se calcula a partir de las dos mediciones. Además, se muestra la curva de caída de presión según la variación de velocidad en la Figura 3.10.

Tabla 3.3 Velocidades utilizados para mediar la pérdida de carga en el elemento combustible del RECH-1

| Frecuencia Bomba [KHz] | Medida 1 | | Medida 2 | | Promedio | |
|------------------------|----------|-------|----------|------|----------|-------|
| | [m/s] | [Pa] | [m/s] | [Pa] | [m/s] | [Pa] |
| 5 | 0,0036 | 800 | 0,0035 | 1500 | 0,0035 | 1150 |
| 10 | 0,0063 | 1200 | 0,0351 | 1800 | 0,0207 | 1500 |
| 15 | 0,1169 | 1500 | 0,1198 | 2600 | 0,1183 | 2050 |
| 20 | 0,2045 | 2400 | 0,2834 | 3100 | 0,2440 | 2750 |
| 25 | 0,3682 | 5400 | 0,4178 | 4100 | 0,3930 | 4750 |
| 30 | 0,5172 | 7700 | 0,5259 | 5200 | 0,5215 | 6450 |
| 35 | 0,6545 | 11400 | 0,6603 | 6100 | 0,6574 | 8750 |
| 40 | 0,7743 | 11500 | 0,7801 | 7500 | 0,7772 | 9500 |
| 45 | 0,8912 | 12000 | 0,9204 | 8100 | 0,9058 | 10050 |
| 50 | 1,0197 | 13100 | 1,0226 | 9800 | 1,0212 | 11450 |

Fuente [7]

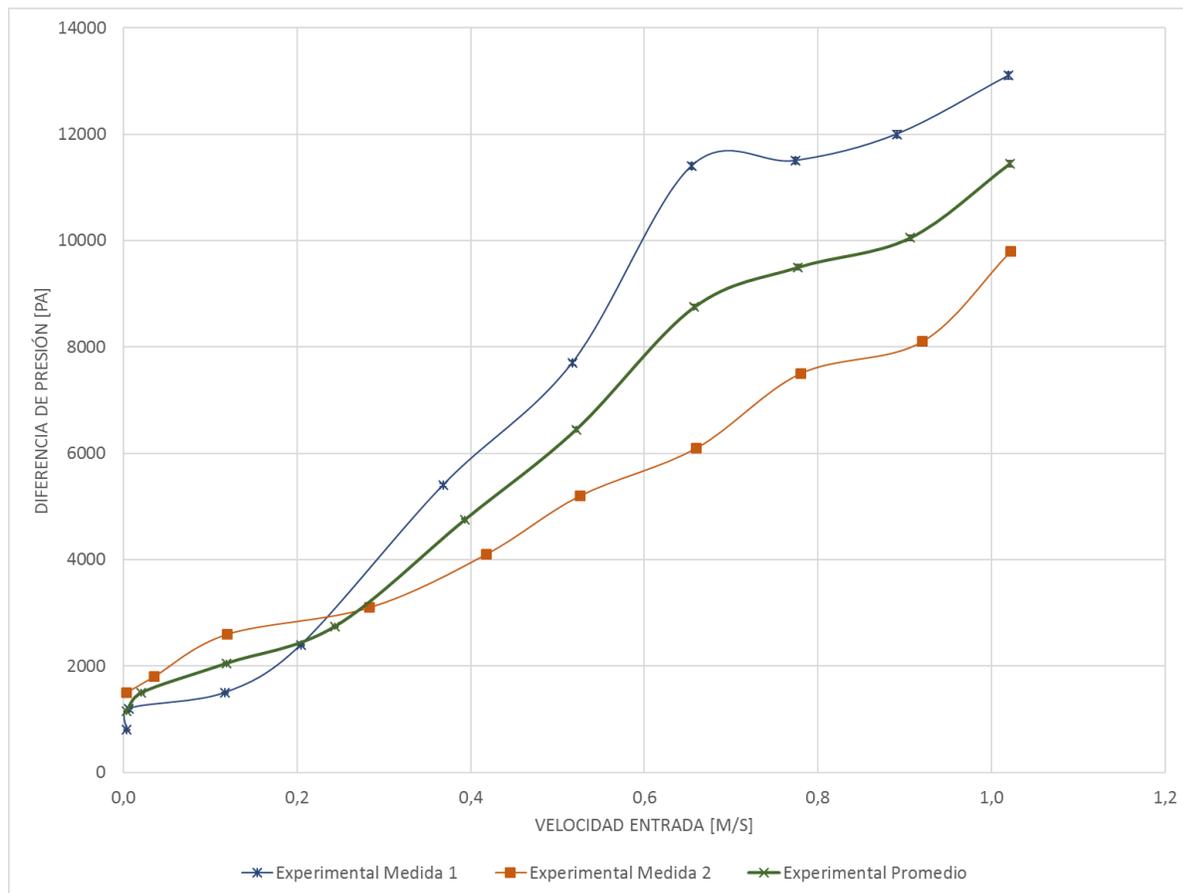


Figura 3.10 Gráfico de la diferencia de presión en función de la variación de caudal, fuente [7]

3.4 Estudios Similares

Como se explica en la motivación, es necesario realizar la caracterización hidráulica de cada elemento combustible, debido a que es imperante saber cómo se comportará dentro del núcleo durante su utilización. Como ya se mencionó en los antecedentes generales, existen 244 reactores de investigación activos, dentro de ellos se encuentra el reactor McMaster (MNR) perteneciente a la Universidad de McMaster en Canadá [8], el cual corresponde a un reactor MTR tipo piscina, cuya potencia es de $5[MWt]$; que utiliza un elemento combustible tipo placa curva pero que para realizar la caracterización hidráulica se aproximó a un elemento combustible tipo placa plana de 18 placas. Este es similar al elemento combustible del RECH-1, ambos están fabricados en Al-6061, el espesor de las placas difiere $0,5[mm]$. En la Figura 3.11 se muestran las dimensiones generales, en b) se aprecia que el largo es aproximadamente $870[mm]$, mientras que el del RECH-1 es de $954[mm]$. La boquilla también sufre una contracción desde el cuerpo del elemento hasta su salida.

La caracterización hidráulica se realizó para una variación de velocidad del refrigerante de $0,59 - 1,49[m/s]$, la medición se realizó con un velocímetro laser doppler con 54 puntos ubicados en un cuarto de la geometría, con la cual se determinó la pérdida de carga y los perfiles de velocidad a través del elemento combustible.

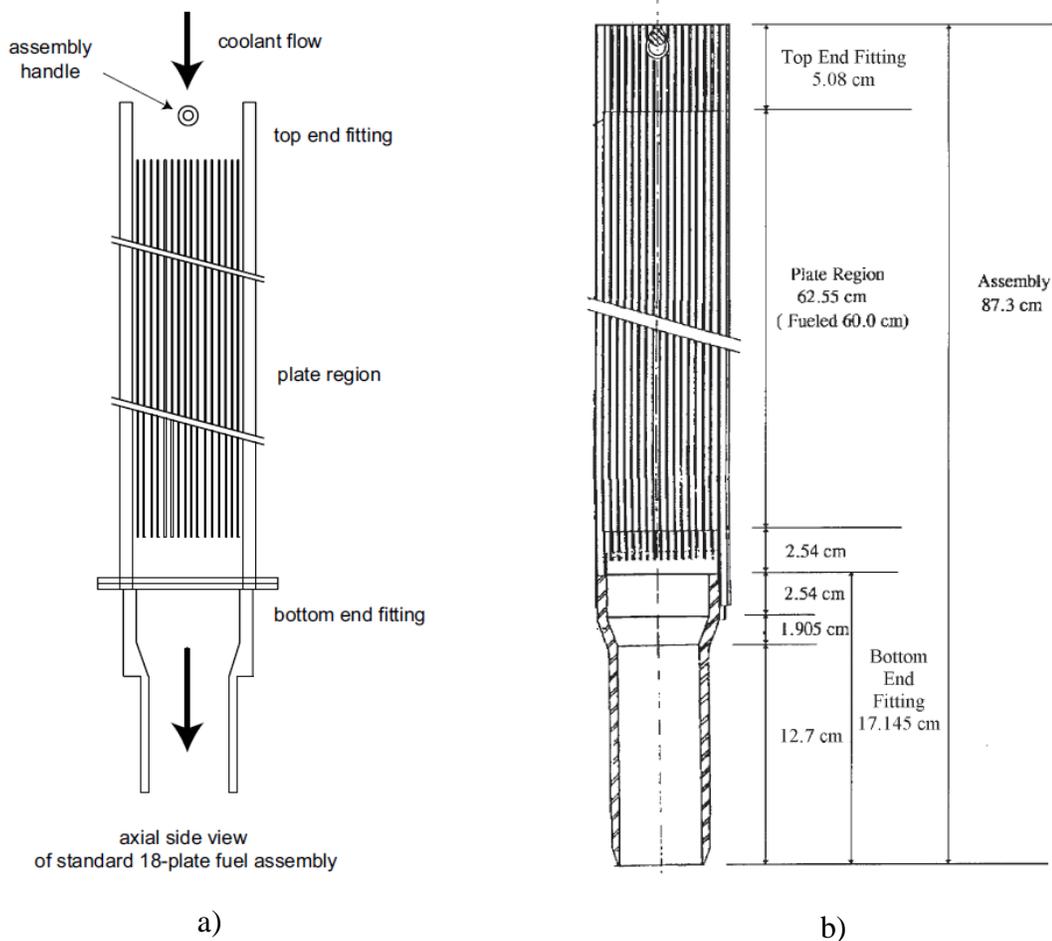


Figura 3.11 Elemento combustible del MNR,. Fuente [8]

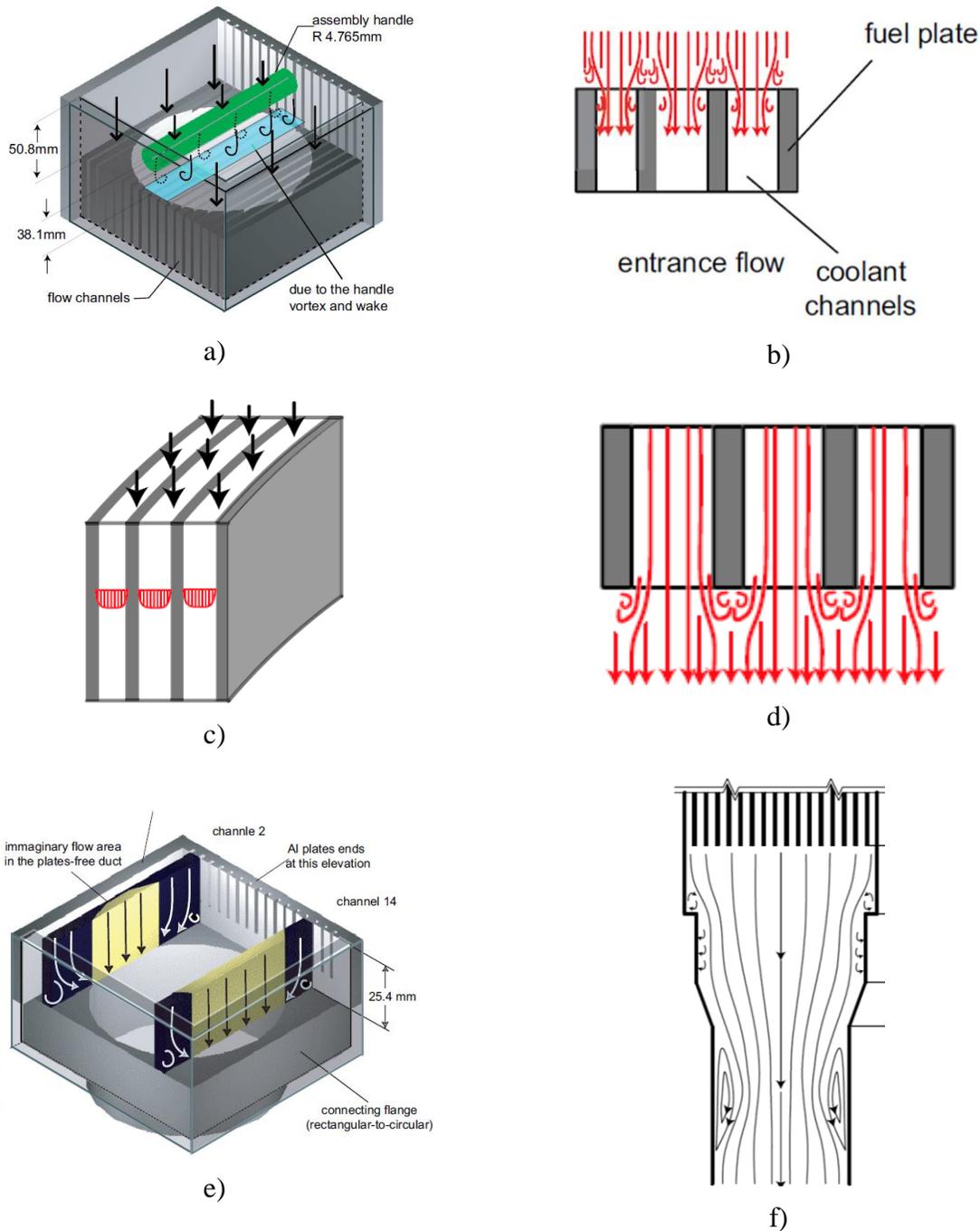


Figura 3.12 Comportamiento del flujo a medida que avanza en el elemento combustible. Fuente [8]

Para entender lo que ocurre con el fluido al atravesar el elemento combustible, se debe analizar las distintas partes que lo componen, en la Figura 3.12 se puede apreciar qué sucede con las líneas de corriente; cuando se enfrentan con el elemento combustible debe rodear al travesañó cilíndrico como se muestra en a), generando las primeras recirculaciones, mientras que el resto del flujo avanza sin encontrar resistencias; luego, el flujo se encuentra con las placas combustibles que se disponen de manera paralela y crean canales, en esta instancia el fluido impacta contra las placas,

en donde se generan remolinos y puntos de estancamiento como se muestra en b); una vez que ya ingresó a la zona de canales, el flujo se comporta como un fluido entre placas paralelas infinitas, es decir, desarrolla un perfil de velocidades como se aprecia en c); cuando llega al final de los canales se ve expuesto a un cambio de geometría y expansión, lo que provoca remolinos y perturbaciones en las líneas de corriente, como se aprecia en d); luego, el fluido, entra a la zona de transición entre las placas y la boquilla de descarga, como se muestra en e), aquí el fluido se enfrenta a una reducción del área pasando de una geometría cuadrada a una circular de menor tamaño, por lo que se genera un estancamiento del fluido. Finalmente, el fluido accede a la boquilla de descarga, en esta existen cambios de sección como se muestra en f), por cada contracción ocurre un recirculamiento del fluido. Cada cambio de geometría y elemento que opone resistencia corresponde a pérdida de presión.

El resultado de la caracterización hidráulica corresponde al gráfico de pérdida de presión según la variación de flujo másico, en el gráfico de la Figura 3.13, tiene la pérdida de presión para;

- Zona de placas: Pressure drop through the plate region DPFUL
- Zona de boquilla: Pressure drop through bottom end fitting DPOUT
- Elemento combustible completo: Pressure drop the whole assembly $DPTS = DPFUL + DPOUT$

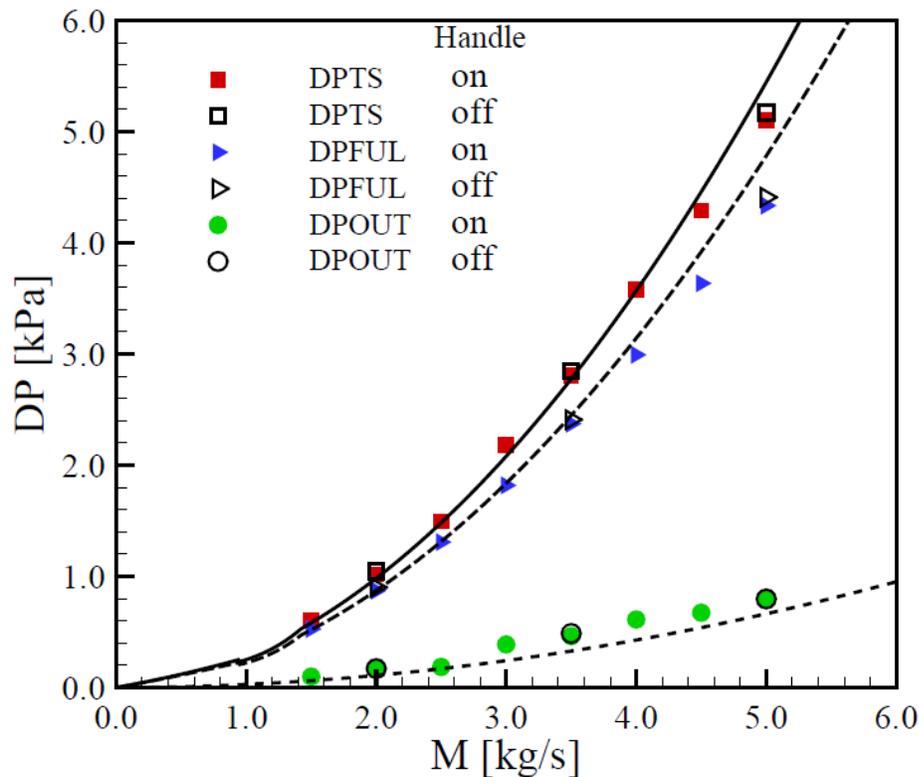


Figura 3.13 Gráfico que presenta la pérdida de presión en función de la variación del flujo másico a través del elemento combustible. Fuente [8]

3.5 Mecánica de Fluidos

Para entender el problema, y buscar una solución, se debe recurrir a la materia Mecánica de Fluidos. Donde, lo primero que se realizará es una descripción de las características principales del flujo con el que se trabajará:

3.5.1 Viscosidad

Según Robert Mott; es la propiedad de un fluido que ofrece “resistencia al movimiento relativo de sus moléculas” [9]. Es importante mencionar que la magnitud de viscosidad depende de la tensión de corte, la cual se define como la fuerza requerida para deslizar una capa de área unitaria de una sustancia sobre otra capa de la misma sustancia. Es una de las propiedades que influye en la potencia necesaria para mover una superficie aerodinámica a través de la atmósfera. Responde a las pérdidas de energía asociadas con el transporte de fluidos en ductos, canales y tuberías. Por lo que es una propiedad del fluido muy importante en el estudio de flujos.

La viscosidad μ del fluido para un campo de flujo simple (plano) del estilo $u = u(y)$, se define mediante la relación [10]

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.2)$$

Donde τ es el esfuerzo de corte y u es la velocidad en la dirección x . La unidad de medida de τ es N/m^2 y de μ es $N \cdot s/m^2$.

En el caso del problema a desarrollar el fluido de trabajo es agua, el cual corresponde a un fluido Newtoniano, es decir, el esfuerzo de corte del fluido es directamente proporcional al gradiente de velocidad. La viscosidad del agua depende de la temperatura, en la Tabla 3.4 se puede apreciar el cambio de viscosidad del agua según la temperatura.

Una vez que se explicó el concepto de viscosidad, se puede hablar de un fluido No Viscoso, este corresponde a un fluido en que los efectos de la viscosidad no influyen significativamente en el flujo y por lo tanto son ignorados. Para modelar un flujo no viscoso analíticamente, se debe anular la viscosidad (equivale a cero), esto hace que todos los efectos viscosos sean cero. Experimentalmente, es difícil tener un fluido no viscoso, porque el fluido de interés (agua) posee viscosidad. Sin embargo, si los esfuerzos de corte en el flujo son pequeños y actúan en áreas tan pequeñas que no afectan significativamente el campo de flujo, este se puede considerar un flujo no viscoso.

Tabla 3.4 Cambio de viscosidad según el cambio de temperatura

| Temperatura [°C] | Viscosidad μ [$N \cdot s/m^2$]. |
|------------------|---------------------------------------|
| 0 | $1,792 \times 10^{-3}$ |
| 5 | $1,519 \times 10^{-3}$ |
| 10 | $1,308 \times 10^{-3}$ |
| 15 | $1,140 \times 10^{-3}$ |
| 20 | $1,005 \times 10^{-3}$ |
| 30 | $0,801 \times 10^{-3}$ |
| 40 | $0,656 \times 10^{-3}$ |

Fuente [10]

La aproximación de flujo no viscoso no se apega del todo a la realidad. Por ejemplo, se tiene un flujo no viscoso alrededor de una esfera, como el que se muestra en la Figura 3.14. Existe un punto de estancamiento donde $V = 0$ tanto adelante como atrás de la esfera. Mediante la ecuación de Bernoulli, se predice una presión máxima en los puntos de estancamiento A y C porque la velocidad es cero en dichos puntos. En el punto B existirá una velocidad máxima, y por lo tanto una presión mínima. En el flujo no viscoso de la parte a) el fluido que fluye de B a C lo hace desde la región de baja presión cerca de B hasta la región de alta presión C. En el flujo real, ver b), existe una delgada capa límite en el que la velocidad se reduce a cero en la superficie de la esfera. Este fluido, que fluye lento, cerca del límite no posee la cantidad mínima de velocidad para llegar a la región de alta presión cerca de C; el resultado es que el fluido se separa del límite (la línea de corriente abandona el límite) y se crea una región de separación, una región en que el fluido recircula, como se aprecia en b). La presión no se incrementa, sino que permanece relativamente baja en la parte trasera de la esfera. La alta presión que existe cerca del punto de estancamiento delantero nunca se recupera en la parte trasera de la esfera, y el resultado es una fuerza de arrastre relativamente grande en la dirección del flujo.

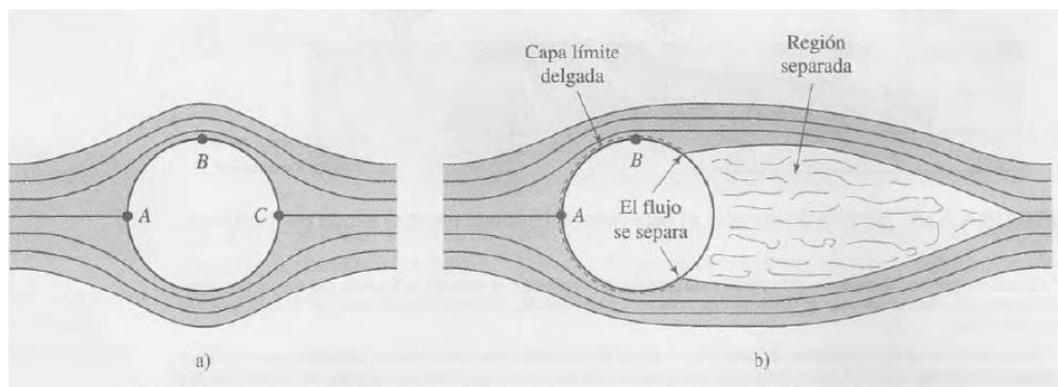


Figura 3.14 Flujo alrededor de una esfera: a) flujo no viscoso, b) flujo real. Fuente [10]

3.5.2 Flujo Laminar Desarrollado

En un flujo laminar el fluido se mueve sin mezclarse significativamente con sus partículas vecinas. Si se inyectara tinta al flujo, esta no se mezclaría con el fluido cercano excepto por actividad molecular; este se mantendría idéntico por un largo periodo de tiempo. Los esfuerzos de corte viscosos influyen en un flujo laminar.

En un flujo turbulento los movimientos del fluido varían irregularmente de tal modo que las cantidades tales como la velocidad y presión muestran una variación aleatoria con el tiempo y las coordenadas espaciales. Las cantidades físicas con frecuencia se describen mediante promedios estadísticos.

El motivo por el cual un flujo puede ser laminar o turbulento tiene que ver con lo que sucede con una pequeña alteración del flujo. Una alteración del flujo puede incrementar o disminuir su magnitud. Si la perturbación aumenta, un flujo laminar se puede tornar inestable y el flujo puede llegar a ser turbulento. Y, si la perturbación disminuye, el flujo permanece laminar.

La medida adimensional que sirve como herramienta para predecir el régimen del flujo se conoce como Número de Reynolds, el cual se expresa de la forma

$$Re = \frac{\rho V_m D_e}{\mu} \quad (3.3)$$

Donde D_e y V son el diámetro hidráulico y velocidad media, respectivamente, μ es la viscosidad dinámica y ρ corresponde a la densidad. Donde A corresponde al área y P al perímetro de la geometría, se define

$$D_e = \frac{4A}{P} \quad (3.4)$$

A partir de esto, se define un número de Reynolds crítico (Re_{cri}), de modo que el flujo es laminar si $Re < Re_{cri}$. Por ejemplo, se determinó que en el flujo en el interior de un tubo con paredes rugosas tiene un número de Reynolds crítico de $Re_{cri} \approx 2100$. Éste es el número de Reynolds crítico mínimo utilizado en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería. El número de Reynolds es distinto para cada geometría, por ejemplo, es de 1500 para flujo entre placas paralelas si se utiliza la velocidad promedio y la distancia entre placas.

3.5.3 Flujo Incompresible

Un flujo incompresible existe cuando la densidad (ρ) de cada partícula del fluido permanece sustancialmente constante conforme se desplaza a través del campo de flujo, esto se plasma en

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (3.5)$$

En el caso particular del problema a desarrollar, se utiliza agua a temperatura constante, por lo que se trabajará con un flujo incompresible

3.5.4 Pérdida de Presión en Placas Paralelas

Se tiene un flujo laminar moviéndose a través de dos placas paralelas estáticas, este problema se modela como un flujo plano, es decir, en dos dimensiones. En donde la distribución de velocidad depende de $u(y)$, además, la altura de las placas no varía. A partir de las ecuaciones de continuidad y Navier-Stokes, con las simplificaciones de flujo incompresible, flujo plano y la condición de continuidad, se puede expresar la caída de presión para un canal horizontal, como el que se muestra en la Figura 3.15, en función del promedio de la velocidad como

$$\Delta p = \frac{1,2\mu VL}{a^2} \quad (3.6)$$



Figura 3.15 Flujo a través de placas paralelas. Fuente [9]

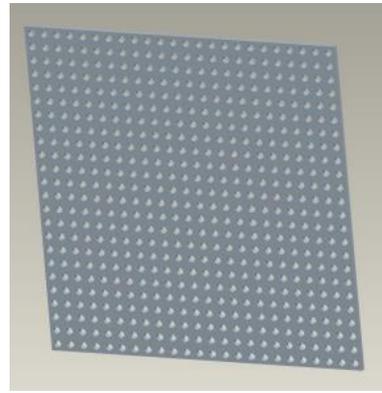
3.5.5 Pérdida de Presión en Placas Perforadas

Dentro de las aplicaciones de ingeniería del área de Mecánica de Fluidos, se tienen las placas perforadas que, en un principio, se utilizan para filtración de fluidos o control de la presión en ductos. Las placas perforadas poseen diversas geometrías, materiales, cantidad de perforaciones como se muestra en la Figura 3.16, donde en la figura a) se tiene una placa de la empresa Emerson con una geometría cilíndrica con cuatro perforaciones en su centro y que se utiliza en las redes de piping para el control de flujo y presión; también se muestra en b) una placa que se instala en los ductos de aire y cumple la función de filtro. [11]

El estudio y experimentación de placas perforadas ha sido el trabajo de varios investigadores a través de las décadas, en estos años de trabajo se ha logrado formular diversas aproximaciones entorno a las placas perforadas [12]. Se han caracterizados para diversos fluidos como agua, aire, fluidos mixtos, de bajo y alto número de Reynolds, distintos diámetros de las perforaciones, espesores de placas, materiales y acabado superficial.



a)



b)

Figura 3.16 Placas perforadas, en a) se tiene una placa para instalar en cañerías para controlar el flujo y su presión¹, en b) se tiene una placa para instalar en un ducto de aire para filtrar partículas. Fuente [11]

Con el paso de los años se ha montado bancadas experimentales, como la que se muestra en Figura 3.17, en esta se simula un ducto de ventilación. También se ha avanzado en el área de Fluidodinámica Computacional y, así, se han logrado simular fluidos a través de las placas con orificios. La visualización computacional ha permitido analizar en detalle el comportamiento de las líneas de corrientes y particular como se puede apreciar en la Figura 3.18.

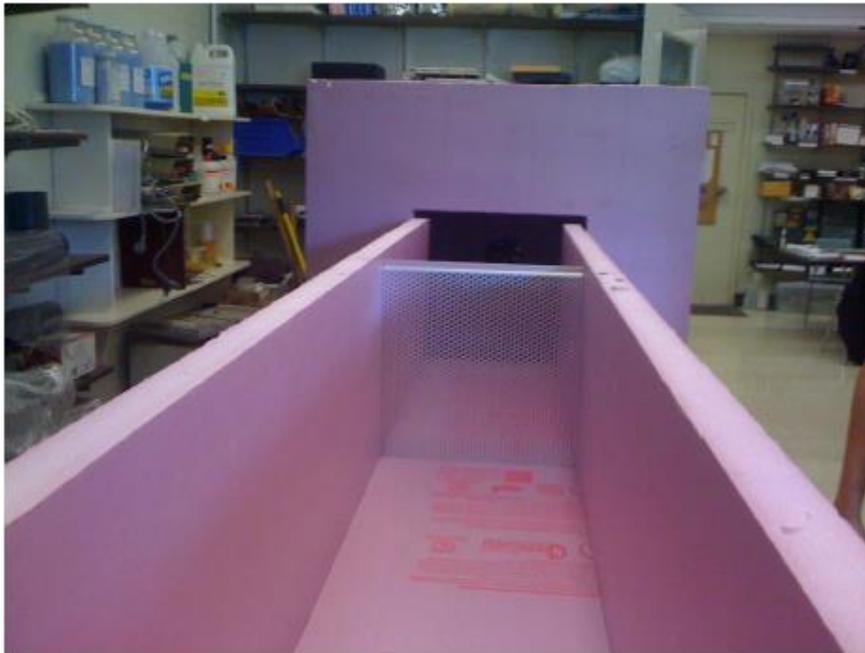


Figura 3.17 Instalación de un túnel de viento con una placa perforada en su centro. Fuente [11]

¹ Cortesía de Emerson Process control system

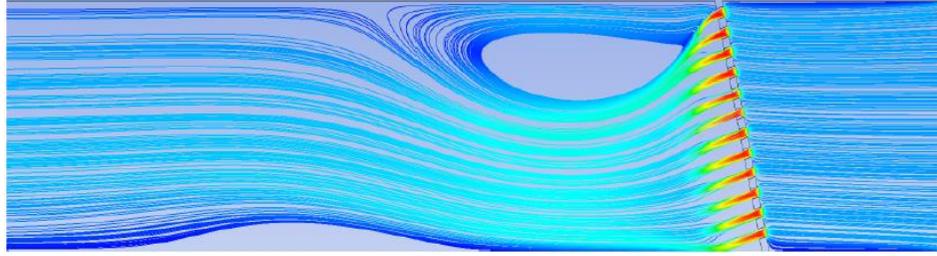


Figura 3.18 Líneas de flujo a través de una placa perforada, generadas en un programa computacional. Fuente [11]

Los estudios recabados se han traducido en fórmulas de pérdida de presión, que se conocen como pérdidas menores de presión o resistencias de flujo, lo cual se expresa analíticamente a través de la pérdida de energía asociada al flujo que entra a las perforaciones y la posterior expansión que ocurre de manera súbita. Así que resulta necesario definir el *coeficiente de pérdida* de una placa perforada, el cual depende de la porosidad de la placa φ , de los bordes de las perforaciones, número de Reynolds, el espesor de la placa t . En general, se asume que la velocidad en el centro de la contracción es subsónica. Si A es el área de perforada, A_s es el área de la placa, A_0 es el área de cada perforación, d_h es el diámetro hidráulico del orificio (para una geometría circular es simplemente d), π_0 es el perímetro del orificio y V es la velocidad promedio del flujo, se establecen las siguientes relaciones

$$\varphi = A/A_s \quad (3.7)$$

$$d_h = 4A/\pi_0 \quad (3.8)$$

Si se utiliza la pérdida de presión en altura de agua h_l y se define k como el coeficiente de pérdida, se puede calcular

$$h_l = k * \frac{V^2}{2g} \quad (3.9)$$

Y es así como para diversas investigaciones se han propuesto expresiones para k , las cuales dependerán de las propiedades de la placa, del fluido de trabajo y número de Reynolds. En este caso se mostrará la expresión para una placa perforada con perforaciones cuyo bordes no han sido suavizados, además, debe cumplir la relación $t/d_h = 0$ a 0.015 y en número de Reynolds del orificio $R_0 > 10^5$, se tiene

$$k = \frac{(0.707\sqrt{1-\varphi} + (1-\varphi))^2}{\varphi^2} \quad (3.10)$$

Donde R_0 corresponde al número de Reynolds calculado a partir de la velocidad en el orificio $V_0(R_0 = V_0 \cdot d_h/\nu$ donde ν corresponde a la viscosidad cinemática del agua).

Para placas muy delgadas, es decir, con su relación entre espesor/diámetro perforación ($t/d_h > 0.015$), el coeficiente de pérdida está determinado por

$$k = \frac{k_0 + \lambda \cdot \frac{t}{d_h}}{\varphi^2} \quad (3.11)$$

Donde λ es el factor de fricción para el flujo dentro del orificio (el cual, para R_0 grandes, se puede asumir como una función de la rugosidad relativa dentro del orificio, como se indica en el Diagrama de Moody) y k_0 se define como

$$k_0 = (0,5 + \tau(1 - \varphi)^{0,5})(1 - \varphi) + (1 - \varphi)^2 \quad (3.12)$$

Donde τ está en función de t/d_h que se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Variación de τ con t/d_h

| | | | | | | | | | | |
|---------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|---|----|
| t/d_h | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.4 | 2 | 3 | >3 |
| τ | 1.35 | 1.22 | 1.1 | 0.84 | 0.42 | 0.24 | 0.1 | 0.02 | 0 | 0 |

Fuente: extraído y adaptado de [12]

Para placas perforadas tanto gruesas como delgadas con un flujo laminar y en transición, el coeficiente de pérdidas, k_l , está dado por

$$k_l = \frac{k_f}{\varphi^2} + \varepsilon k \quad \text{for } 30 < R_0 < 10^4 \text{ to } 10^5 \quad (3.13)$$

$$k_l = \frac{33/R_0}{\varphi^2} + \varepsilon k \quad \text{for } 10 < R_0 < 25 \quad (3.14)$$

$$k_l = \frac{33/R_0}{\varphi^2} \quad \text{for } 10 < R_0 \quad (3.15)$$

En donde k_f es función de R_0 y φ se muestra en la Tabla 3.6, y ε está en función de R_0 como se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.6 Variación k_f con la porosidad y el número de Reynolds en el orificio

| φ | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 |
|-----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R_0 | k_f | | | | | | | | | |
| 25 | 1.94 | 1.78 | 1.57 | 1.35 | 1.1 | 0.85 | 0.58 | 0.4 | 0.2 | 0.03 |
| 40 | 1.38 | 1.36 | 1.16 | 0.99 | 0.75 | 0.56 | 0.37 | 0.24 | 0.13 | 0.03 |
| 60 | 1.14 | 1.05 | 0.88 | 0.79 | 0.55 | 0.3 | 0.23 | 0.13 | 0.08 | 0.02 |
| 100 | 0.89 | 0.85 | 0.75 | 0.57 | 0.34 | 0.19 | 0.11 | 0.06 | 0.03 | 0 |
| 200 | 0.69 | 0.67 | 0.57 | 0.4 | 0.19 | 0.1 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 0 |
| 400 | 0.64 | 0.57 | 0.43 | 0.28 | 0.12 | 0.06 | 0.03 | 0.02 | 0 | 0 |
| 1000 | 0.39 | 0.36 | 0.3 | 0.19 | 0.07 | 0.03 | 0.02 | 0 | 0 | 0 |
| 2000 | 0.3 | 0.26 | 0.22 | 0.14 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0 | 0 | 0 |
| 4000 | 0.22 | 0.2 | 0.17 | 0.1 | 0.03 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10000 | 0.15 | 0.13 | 0.1 | 0.06 | 0.02 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20000 | 0.11 | 0.09 | 0.07 | 0.04 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100000 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 200000 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: extraído y adaptado de [12]

Tabla 3.7 Variación de ε con el número de Reynolds en orificio

| | | | | | | | |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| R_0 | 25 | 40 | 60 | 100 | 200 | 400 | 10^3 |
| ε | 0.34 | 0.36 | 0.37 | 0.4 | 0.42 | 0.46 | 0.53 |
| R_0 | $2 \cdot 10^3$ | $4 \cdot 10^3$ | $1 \cdot 10^4$ | $2 \cdot 10^4$ | $1 \cdot 10^5$ | $2 \cdot 10^5$ | $1 \cdot 10^6$ |
| ε | 0.59 | 0.64 | 0.74 | 0.81 | 0.94 | 0.96 | 0.98 |

Fuente: extraído y adaptado de [12]

Miller [13] planteó una relación para el coeficiente de pérdida para bordes rectos expresada en términos de la porosidad (φ) y la relación t/d para $R_0 > 1000$ y que se muestra en la Figura 3.19.

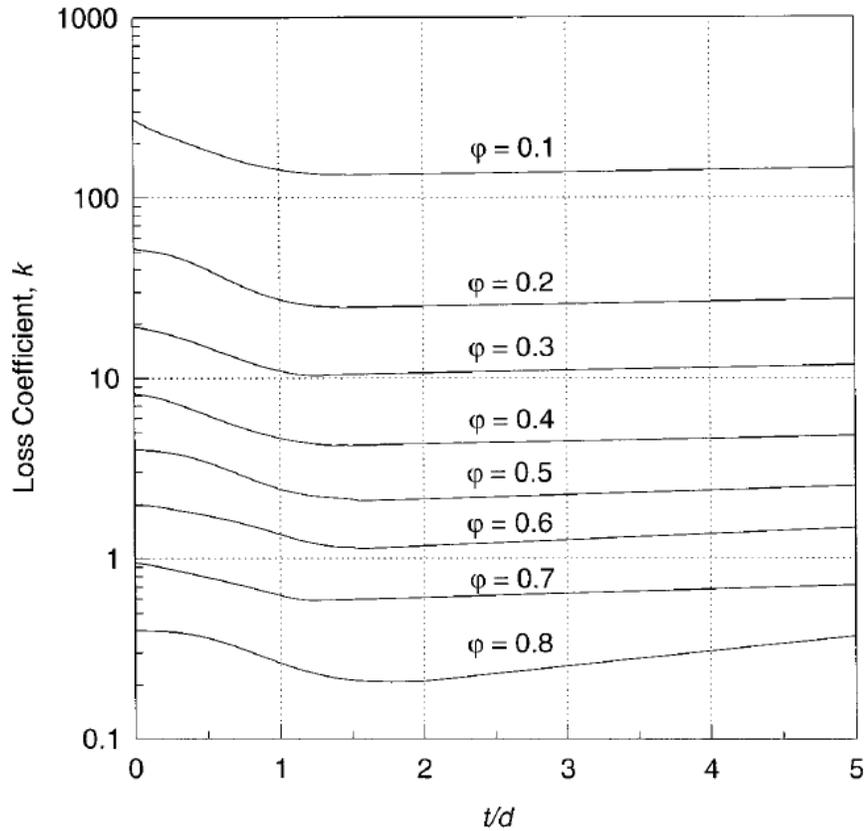


Figura 3.19 Coeficiente de pérdida en función de la porosidad y t/d , fuente [13]

3.5.6 Pérdida de Presión en Boquilla

Para una contracción gradual, como se muestra en Figura 3.20, también se utiliza el coeficiente de pérdida (k) para determinar la pérdida de presión con la ecuación (3.9), en este caso el coeficiente de pérdida está determinado por [14]:

$$k = \frac{0.8 \cdot \text{sen}(\theta/2) \cdot [1 - (D_2/D_1)^2]}{(D_2/D_1)^4} \quad \text{Si } \theta \leq 45^\circ \quad (3.16)$$

$$k = \frac{0.5 \cdot [1 - (D_2/D_1)^2] \cdot \sqrt{\text{sen } \theta/2}}{(D_2/D_1)^4} \quad \text{Si } 45 < \theta \leq 180^\circ \quad (3.17)$$

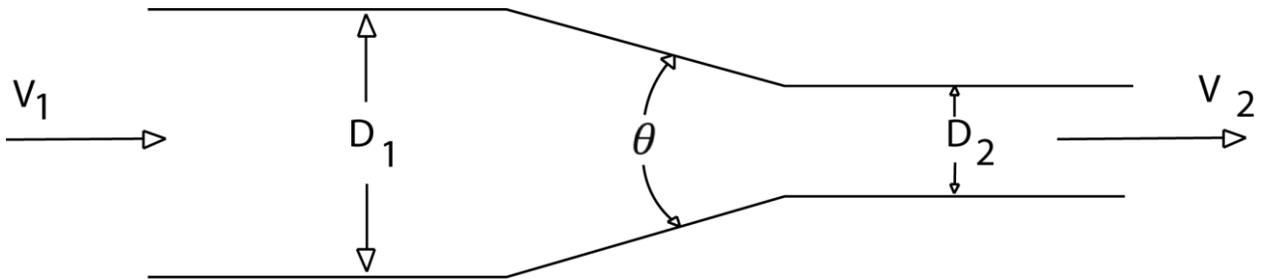


Figura 3.20 Contracción gradual -boquilla- y los parámetros que la determinan. Fuente [14]

3.5.7 Pérdida de Presión por Obstáculos en Canal Confinado

La literatura existente más adecuada para el problema a desarrollar, se presenta como un canal cerrado y dos bloques cuadrados obstaculizando el paso del flujo, como se muestra en la Figura 3.21.

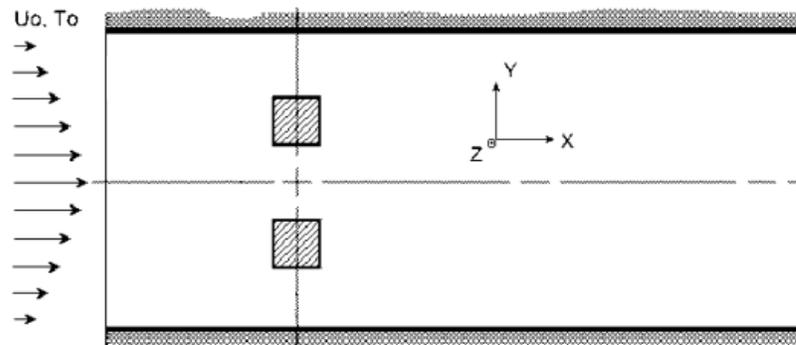


Figura 3.21 Diagrama que muestra flujo en canal confinado obstaculizado por dos bloques cuadrados. Fuente: [15].

Para este caso, se genera un factor de pérdida de flujo aparente (f_{app}) que cumple el rol del coeficiente de pérdida (k) y el cual está determinado por

$$f_{app} = C_{D1} \frac{d}{2L} + C_{D2} \frac{d}{2L} \quad (3.18)$$

Donde C_{D1} y C_{D2} corresponde al coeficiente de arrastre (C_d), L corresponde al largo del canal y d corresponde a la relación $d = 0.125H$ con H el ancho del canal.

En el caso particular del problema a desarrollar, se toma C_d como 1,4 y se utiliza dicho coeficiente para ambos bloques [15].

Así, la pérdida de carga en un canal confinado y obstaculizado se define por

$$h_l = f_{app} \frac{V^2}{2g} \quad (3.19)$$

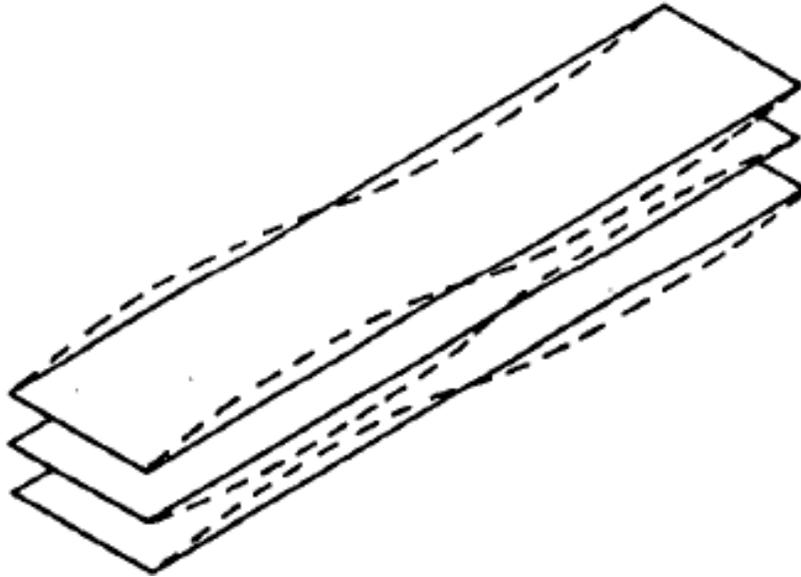


Figura 3.22 Pandeo de las placas paralelas. Fuente [16]

3.5.8 Velocidad Crítica del Fluido

Debido a las tolerancias en la fabricación del elemento combustible, es muy difícil que las placas combustibles sean perfectamente paralelas. En este caso, algunos canales pueden estar más cerca que otros. En un estrechamiento del canal, hay un aumento de la velocidad del fluido (refrigerante) y, como consecuencia, una reducción de la presión estática. De la ecuación de Bernoulli, se sabe que la diferencia de presión es proporcional al cuadrado de la velocidad. La velocidad del fluido que hace que la carga de pandeo sea el crítico se denomina *velocidad crítica*, como se aprecia en la Figura 3.22. A esta velocidad, las placas se vuelven inestables que pueden producir desviaciones. Estas desviaciones pueden causar un sobrecalentamiento local de las placas de combustible y posiblemente una obstrucción completa del refrigerante. Miller [16] deriva una fórmula para la velocidad crítica a partir de las interacciones entre las variaciones en las áreas de sección transversal de los canales de refrigeración, velocidades de refrigerante y presiones en dos canales adyacentes. Para fines de diseño, se recomienda que la velocidad del fluido se limite 2/3 de la velocidad crítica dada por la expresión:

$$V_{crit} = \left[\frac{15 \cdot E \cdot t_p^3 \cdot t_w}{\rho w^4 (1 - \nu^2)} \right]^{0.5} \quad (3.20)$$

Donde

E : Módulo elástico [Kpa]

ρ : Densidad fluido kg/m^3

t_p : Espesor de la placa [mm]

w : Ancho del canal refrigerante [mm]

t_w : Espesor entre placas [mm]

ν : Módulo de Poisson [Kpa]

3.6 Mecánica de Fluidos Computacional

En esta sección se dará una breve descripción de los conceptos de mecánica de fluidos computacional, se explicará el método de volúmenes finitos y los métodos de mallado.

También conocida como fluido dinámica computacional (CFD por sus siglas en inglés), corresponde al análisis de fluido en movimiento, es una técnica muy poderosa y utilizada en diversas áreas de la aplicación industrial y académica. Se utiliza de manera complementaria a los métodos experimentales, además entrega herramientas para visualizar en detalle los fenómenos que ocurren en el fluido.

Los programas de CFD poseen interfaces sofisticadas y amigables con el usuario, con lo que es más simple ingresar las condiciones del problema a estudiar. El funcionamiento de estos programas consta de tres elementos principales: (i) Pre-proceso, (ii) Solver y (iii) Post-proceso [17].

3.6.1 Ecuaciones Gobernantes

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido Newtoniano incompresible son las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía. La ecuación de conservación de masa es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.21)$$

Donde ρ es la densidad del fluido y $\vec{u} = u \hat{i} + v \hat{j} + w \hat{k}$ es el vector velocidad.

A continuación, se presentan las ecuaciones de conservación de momentum, o de Navier-Stokes, en x, y, z :

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.22)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.23)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3.24)$$

Donde p es la presión, μ la viscosidad dinámica y g la gravedad.

Finalmente, se debe considerar la conservación de energía:

$$\nabla \cdot \vec{V} + \nabla \cdot q = 0 \quad (3.25)$$

Las ecuaciones anteriores provienen de la mecánica clásica y la termodinámica, y definen un sistema de siete ecuaciones y siete variables. Este sistema se puede resolver dadas las condiciones iniciales y de borde adecuadas; pero rara vez es posible encontrar una solución analítica, dado que el sistema es no lineal. De ahí la necesidad del uso de métodos numéricos de solución.

3.6.2 Método de Volúmenes Finitos

Las ecuaciones definidas en la sección anterior describen el sistema a resolver, pero son ecuaciones diferenciales; se necesita formular las mismas ecuaciones de forma integral, para un volumen de control. Si se toma una variable ϕ en representación de una de las variables, se puede formular su Ecuación de conservación de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (3.26)$$

Donde ϕ puede representar la temperatura T , la velocidad en x , o cualquiera de las otras variables. La ecuación (3.26) es la Ecuación de transporte para la propiedad ϕ , y describe todas las formas de transporte en un fluido. Al lado izquierdo de la ecuación, el primer término describe todas las formas de cambio temporal, mientras que el segundo término es el término advectivo; al lado derecho el primer término es el término difusivo (Γ es el coeficiente de difusión), y el segundo término es el término fuente. Tomando valores adecuados de Γ y S_ϕ , se pueden llegar a las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía que se explicitan en la sección anterior.

Se integra la ecuación (3.26) sobre un volumen de control tridimensional, se obtiene la ecuación (3.27):

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \nabla \cdot (\rho\phi\vec{u}) dV = \int_{CV} \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (3.27)$$

Aplicando el teorema de la divergencia de manera apropiada, y además integrando nuevamente la ecuación con respecto al tiempo, se obtiene la forma general de la ecuación de estado para un volumen de control:

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} (\rho\phi) dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_A \vec{n} \cdot (\rho\vec{u}) dA dt = \int_{\Delta t} \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma\nabla\phi) dA dt + \int_{\Delta t} \int_{CV} S_\phi dA dt \quad (3.28)$$

Si se discretiza la ecuación anterior para las siete variables que se describieron anteriormente, se obtiene un sistema de ecuaciones discretizadas que representan las leyes de conservación para un volumen de control finito. A partir de esto, se puede formular el método de volúmenes finitos. Se toma un dominio de cálculo, y se divide en múltiples, no traslapantes volúmenes de control, tal que cada volumen rodea a un punto de la malla. Las ecuaciones diferenciales del problema se integran para cada volumen de control. Luego, resulta un sistema de ecuaciones para cada volumen, o, en general, un sistema matricial que representa el dominio completo de solución. Con las condiciones de borde apropiadas, este sistema se completa y se puede resolver para cada punto de la malla, e interpolar adecuadamente para el resto del dominio. [17]

3.6.3 Acoplamiento de Presión y Velocidad

Una gran dificultad en el modelamiento descrito en la subsección anterior es como modelar el acoplamiento entre presión y velocidad. En el conjunto de ecuaciones descritas anteriormente, se consideraba una ecuación de transporte de la presión en la ecuación (3.26), la cual corresponde a la ecuación de gas ideal. Pero en el caso de flujos incompresibles, donde la presión no depende de la densidad, esta ecuación no entrega información y por lo tanto no existe ecuación de transporte para la presión.

En los casos donde el gradiente de presión es conocido, el método se puede realizar sin problemas; pero en la mayoría de los casos de relevancia en ingeniería, la presión es una incógnita que se busca encontrar, al igual que la velocidad y temperatura. Por lo tanto, se hace necesario introducir un modelo que permita acoplar el cálculo de la presión con la velocidad.

Existen varios modelos que abordan este problema. Uno de los primeros y más ampliamente utilizados es el SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), propuesto por Patankar y Spalding [17]. Este modelo consiste en un método iterativo donde se asume un campo de presiones y se procede a resolver las ecuaciones discretizadas de Navier-Stokes, posteriormente corrigiendo el campo de presiones inicial hasta llegar a una convergencia.

La variación SIMPLEC (SIMPLE-Consistent), propuesto por Van Doornal y Raithby sigue los mismos pasos que el algoritmo SIMPLE, con la diferencia que las ecuaciones de momentum son manipuladas de tal manera que SIMPLEC corrige las ecuaciones de velocidad y omite los términos menos significativos de SIMPLE, convirtiéndolo en un algoritmo más rápido para casos particulares [17].

3.6.4 Mallado y Calidad

Las herramientas computacionales para poder resolver los problemas numéricos, aproximan la geometría mediante la discretización en base a puntos o nodos. Estos nodos se conectan para formar elementos finitos que juntos conforman el volumen del material.

A cada nodo creado en la superficie de un objeto, se le asocia una ecuación diferencial a resolver. De este modo, mientras más fina sea la malla, más precisa será la solución del problema.

Los elementos más comunes que se utilizan para crear la malla [18], corresponden a tetraedros, pirámides, prismas y hexaedros. Las respectivas geometrías se muestran en la Figura 3.23.

Al trabajar con modelos computacionales se debe tener presente la calidad del mallado con el que se resuelve el problema, en el caso particular de ANSYS Fluent, la compañía recomienda métodos que sirven para corroborar la confiabilidad del mallado [19], los cuales corresponden:

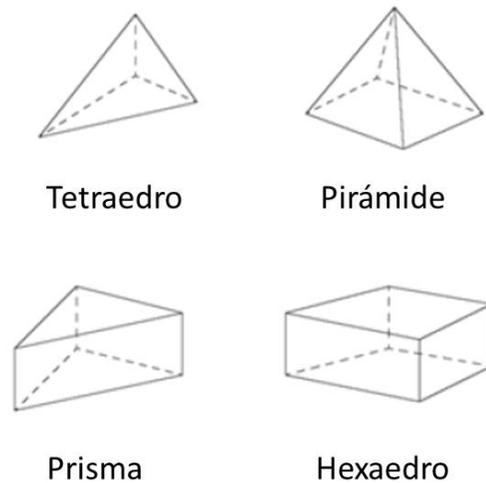


Figura 3.23 Tipos de elementos finitos. Fuente: extraído desde [5]

3.6.5 Skewness

Este método se entiende por la traducción del término “Skewness”, el cual en español se traduce como asimetría. Y su función se centra en la comparación de los triángulos formados al mallar contra triángulos equiláteros, como se muestra en la Figura 3.24, los triángulos se construyen en base a una circunferencia y se determina según la ecuación (3.29). Para el caso de Fluent, se recomienda un parámetro de Skewness menor a 0.9 para tetraedros y en la Figura 3.25 se muestran los rangos y calidad de malla para este parámetro.

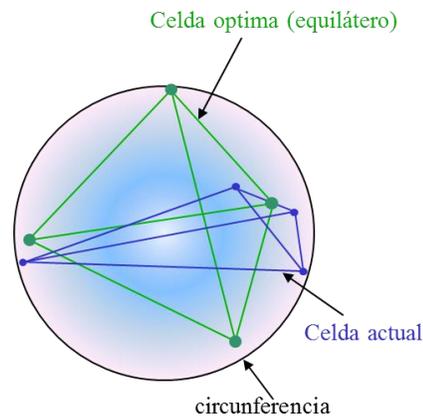


Figura 3.24 Comparación de la celda creada contra celda optima en el método skewness. Fuente: extraído de [19]

$$Skewness = \frac{\text{tamaño de celda optima} - \text{tamaño de celda}}{\text{tamaño de celda optima}} \quad (3.29)$$

| | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|---------------|
| 0-0.25 | 0.25-0.50 | 0.50-0.80 | 0.80-0.95 | 0.95-0.98 | 0.98-1.00* |
| Excellent | very good | good | acceptable | bad | Inacceptable* |

Figura 3.25 Rangos de tolerancia de calidad de malla para los valores de skewness. Fuente: extraído desde [19]

3.6.6 Aspect Ratio

El método de Aspect Ratio (relación de aspecto) mide que tan estirado se encuentra el volumen de control, en triángulos y cuadrados es una relación entre el lado más largo y el lado más corto. El ideal es igual a 1 [18], en la Figura 3.26 se muestra el caso para cuadrados y triángulos equiláteros como la mejor relación. Para el caso de fluido laminar, es aceptable hasta una relación máxima de 5:1 [18].

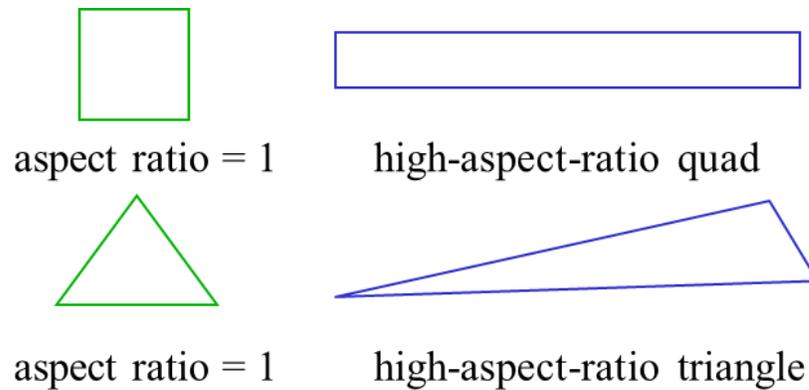


Figura 3.26 Relación de aspecto para cuadrados y triángulos. Fuente: extraído desde [19]

4 Resultados

Para llevar a cabo la presente memoria y lograr completar los objetivos, se utiliza los siguientes pasos como estrategia de desarrollo del problema.

4.1 Definición del Problema

Se toma como parámetro la velocidad nominal de entrada en el elemento combustible, como se especifica en la sección 3.1. Y la velocidad crítica de Miller $V_{cri} = 0,52[m/s]$ (sección 3.5.8) para definir el rango de velocidades en el que se realizará la caracterización hidráulica. Así se toma el rango de $0,01 - 1,15 [m/s]$ y se divide en 10 velocidades distintas que se muestran en la Tabla 4.1.

La condición del tipo de flujo se impone como laminar, esto se extrae desde los documentos de seguridad proporcionados por la IAEA [1], de igual manera, se procede a calcular el número de Reynolds para la geometría del elemento combustible a partir de la ecuación (3.3), con $\mu = 0.001 [N \cdot s/m^2]$ (ver Tabla 3.4), $\rho = 998 [Kg/m^3]$ y $D_h = 0.074 [m]$, los valores se muestran en la Tabla 4.1; con la finalidad de tener una referencia según la bibliografía tradicional de mecánica de fluidos y para utilizar cuando corresponda.

Tabla 4.1 Número de Reynolds para las distintas velocidades

| # | Velocidad [m/s] | Re |
|----|-----------------|-------|
| 1 | 0.01 | 758 |
| 2 | 0.05 | 3792 |
| 3 | 0.10 | 7585 |
| 4 | 0.15 | 11301 |
| 5 | 0.25 | 18886 |
| 6 | 0.35 | 26471 |
| 7 | 0.55 | 41641 |
| 8 | 0.75 | 56810 |
| 9 | 0.95 | 71980 |
| 10 | 1.15 | 87149 |

Fuente: elaboración propia.

Las propiedades del fluido corresponden a la de agua a temperatura ambiente ($20^{\circ}C$), así se puede establecer una comparación con las medidas experimentales que se exponen en la sección 3.3.2. Se agrega a lo anterior que la presión atmosférica se desprecia, dado que se evaluará la diferencia de presión entre la entrada y la salida del elemento combustible. La cual se mide en el sistema internacional, es decir, en Pascales [Pa].

El problema a resolver se resume en el cálculo de la diferencia de presión entre la entrada y salida del fluido en el interior elemento combustible a medida que aumenta la velocidad de entrada ($\Delta P = P_s - P_e$). La caída de presión se debe a los distintos obstáculos que encuentra el fluido en su paso, como se exhiben en la Figura 4.1, los cuales se detallan en la sección 3.2.

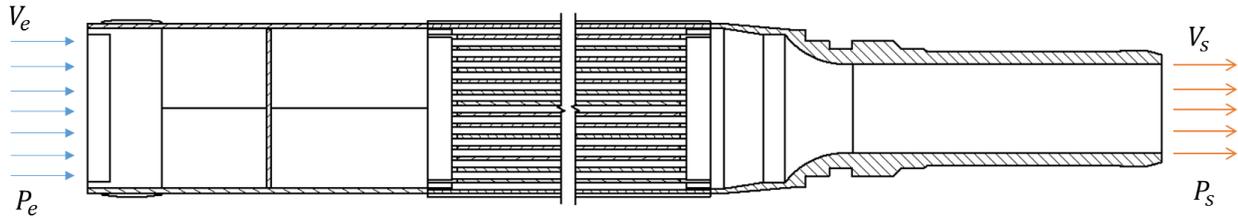


Figura 4.1 Bosquejo del elemento combustible en corto, con las condiciones de entrada y salida. Fuente: elaboración propia.

4.2 Cálculo Analítico

Con el propósito de tener una estimación del orden de magnitud de la pérdida de carga para la velocidad nominal (el resto de las velocidades se mostraran en la sección .

Resultados 0) , se procede a realizar un cálculo en 1-Dimensión a partir de las formulas teóricas expuestas en la sección 3.5, el cálculo se realizará por subconjuntos como se explicó en la sección que describe el elemento combustible:

4.2.1 Pérdida de Presión en la Caja Filtro

Esta se desglosa en la pérdida que aporta el travesaño, la cual se calcula a partir de la ecuación (3.19) donde $C_d = 1,4$, $L = 0,143 [m]$, $H = 0,0747[m]$, $d = 0,0093 [m]$, $g = 9,98 [m/s^2]$ y reemplazando en la ecuación (3.18) se obtiene f_{app} :

$$f_{app} = 2 \cdot 1,4 \frac{0,0093 [m]}{2 \cdot 0,143 [m]} = 0,0914 \quad (4.1)$$

Así, la pérdida de carga queda determinada por

$$h_l = 0,0914 \frac{V^2}{2g} [mca] \quad (4.2)$$

Para transformar este resulta en Pascales se debe utilizar la conversión

$$1 [mca] = 9806,65 [Pa] \quad (4.3)$$

Finalmente, se calcula la pérdida para la velocidad nominal ($V = 0.349 [m/s]$)

$$h_l = 0,0914 \frac{0,349^2}{2 \cdot 9,98} \cdot 9806,65 = 5,4 [Pa] \quad (4.4)$$

También se debe calcular la pérdida aportada por la placa filtro, para ello se utilizan los datos de la geometría

$$\begin{aligned}
t &= 2 [mm] & \varphi &= 0,36 \\
d &= 4,6 [mm] & \mu &= 0,001 [N \cdot s/m^2] \\
t/d &= 0,434 & \rho &= 998 [kg/m^3] \\
\text{Largo} &= 67,6 [mm] & \text{Ancho} &= 70,3 [mm] \\
\text{Área tota} &= 0,00475 [m^2] & \text{Área orificio} &= 1,66 \cdot 10^{-5} [m^2]
\end{aligned}$$

A partir de los datos de la placa y las Tabla 3.5, Tabla 3.6 y Tabla 3.7, se obtienen los coeficientes necesarios para calcular las formulas (3.11)- (3.13)

$$\begin{aligned}
k_0 &= 1,29 & k_f &= 0,02 \\
k &= 9,97 & \varepsilon &= 0,82
\end{aligned}$$

$$k_l = \frac{0,02}{0,36^2} + 0,82 \cdot 9,97 = 8,38 \quad (4.5)$$

$$h_l = 8,38 \frac{0,349^2}{2 \cdot 9,98} \cdot 9806,65 = 498,36 [Pa] \quad (4.6)$$

Con lo que el total de pérdida de presión en la caja filtro es

$$h_{filtro} = 498,36 + 5,4 = 508,4 [Pa] \quad (4.7)$$

4.2.2 Pérdida de presión en el Cuerpo del elemento combustible

El Cuerpo del elemento combustible está conformado por placas combustibles que corresponde a placas paralelas, para esto se utiliza la ecuación (3.6), en donde los parámetros a utilizar corresponden a:

$$a = 1,8 [mm] \quad L = 625 [mm] \quad \mu = 0,001 [N \cdot s/m^2]$$

Con lo que se tiene que la pérdida de carga en un canal resulta

$$\Delta p = \frac{1,2 \cdot 0,001 \cdot 0,349 \cdot 0,625}{0,0018^2} = 80,7 [Pa] \quad (4.8)$$

Se extiende para los 15 canales, $\Delta p * 15$, con lo que la pérdida de presión en el Cuerpo es

$$h_{cuerpo} = 1211,81 [Pa] \quad (4.9)$$

4.2.3 Pérdida de presión en la Boquilla

La Boquilla del elemento combustible corresponde a una contracción graduada, se utiliza la ecuación (3.16) y de la Figura 3.20 se observa los parámetros a determinar para realizar el cálculo . Según se ve en la Figura 3.7 en c), del plano se extrae el valor de $\theta = 44^\circ$ que corresponde al ángulo de contracción, $D_1 = 74 [mm]$ y $D_2 = 38 [mm]$ corresponden a los diámetros de entrada y salida. A partir de estos datos se calcula el coeficiente de pérdida para la boquilla

$$k = 0,8 \cdot \text{sen}(44^\circ/2) \cdot \frac{[1 - (38/74)^2]}{(38/74)^4} = 10,9 \quad (4.10)$$

Con lo que se procede a calcular la pérdida de carga de la Boquilla

$$h_{Boquilla} = 10,9 \cdot \frac{0.349^2}{2 * 9,98} \cdot 9806,65 = 652,4 [Pa] \quad (4.11)$$

4.2.4 Pérdida de Presión en el Elemento Combustible

Finalmente, la pérdida de carga en el elemento combustible se calcula como:

$$\Delta p = P_s - P_e = h_{filtro} + h_{Cuerpo} + h_{Boquilla} = 2373 [Pa] \quad (4.12)$$

4.3 Geometría

La geometría del elemento combustible se construyó en el programa Autodesk Inventor y se muestra en la Figura 4.2, el detalle de cada una de las piezas que lo conforman se encuentran en la sección 3.2, en la Figura 3.5, Figura 3.6 y Figura 3.7.

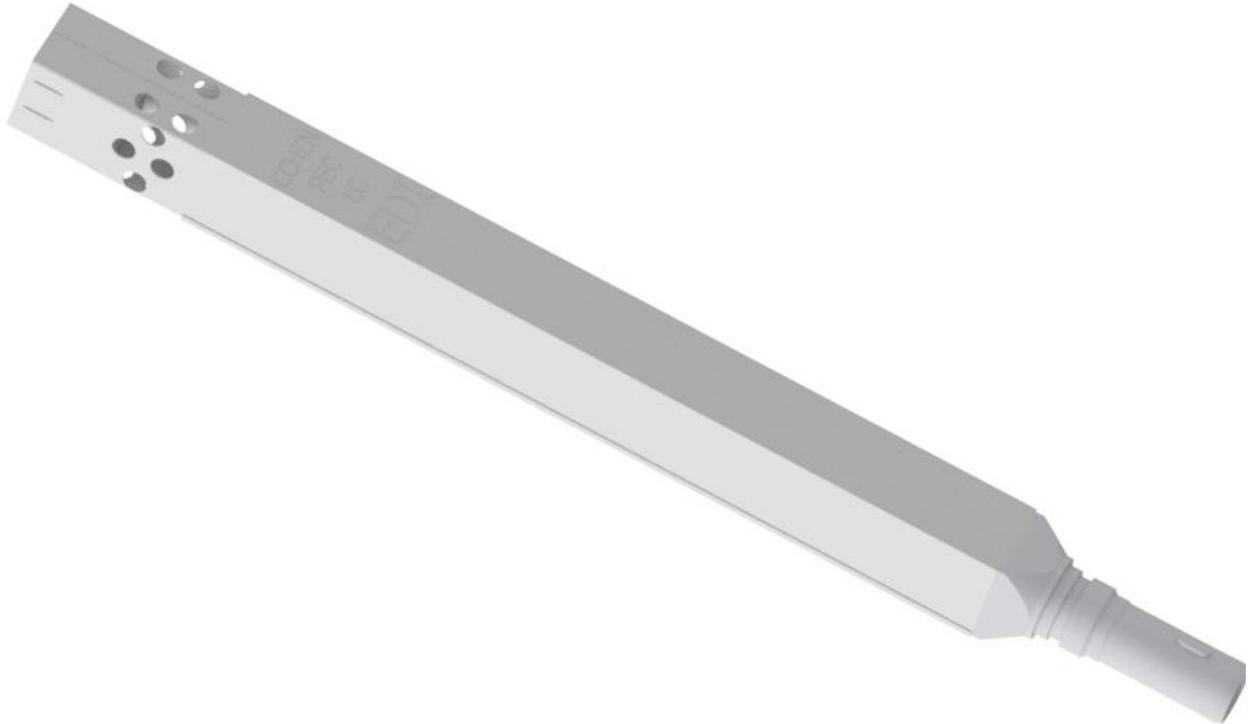
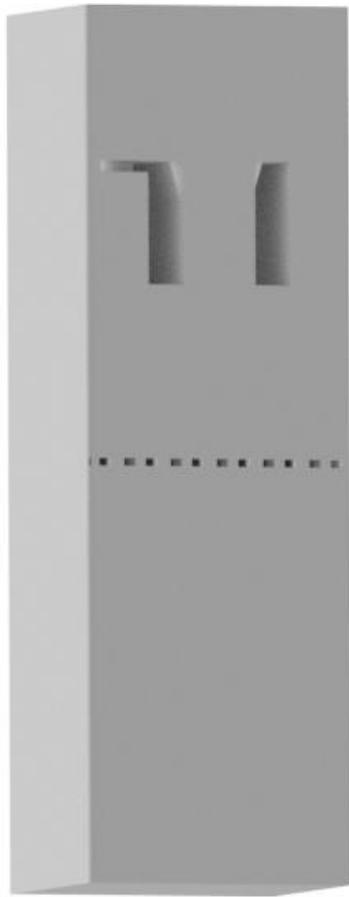


Figura 4.2 Geometría del elemento combustible creada con el programa computacional. Fuente: elaboración propia.

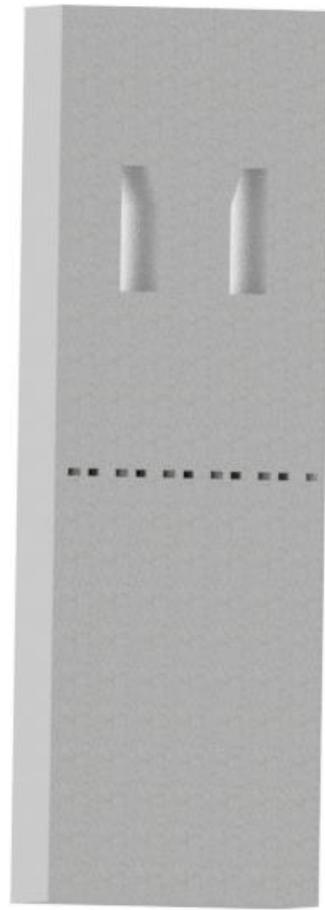
El programa trabaja con el fluido que circula en el interior del elemento, por lo que se debe generar el *negativo/vaciado* de la geometría original. Para esta tarea se utiliza el mismo programa y, al igual como se realizó en la descripción, se genera los negativos por subconjuntos y la geometría del elemento combustible al final. Así, se obtienen los negativos:

4.3.1 Caja Filtro

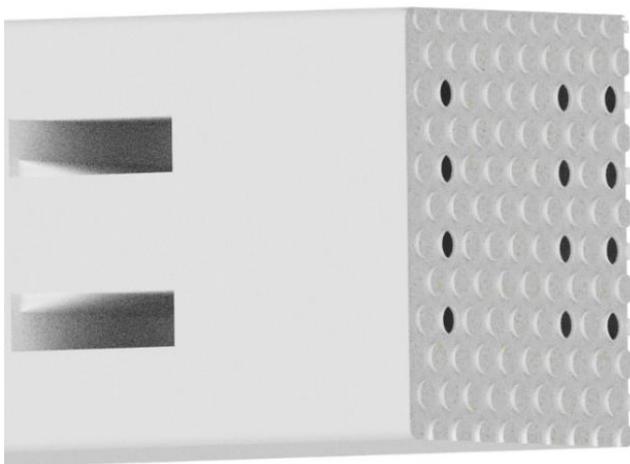
A la geometría original de la Caja Filtro se le extiende la entrada y salida del fluido, esto se realiza para simular de manera más fidedigna a la situación en el núcleo. El vaciado resultante se muestra en la Figura 4.3, en esta se tiene que en a) se exhibe una vista global de la geometría, donde se aprecia el espacio ocupado por la pieza de orientación, los travesaños y la placa filtro; en b) se realiza un corte transversal al vaciado y se muestra el espacio que sigue utilizando los travesaños; en c) se realiza un corte a la mitad de la placa filtro y en d) se muestra en detalle los cilindros que forma el agua al pasar por los orificios.



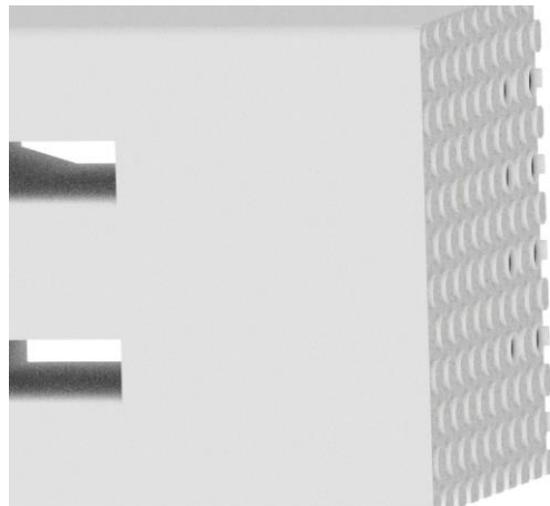
a)



b)



c)



d)

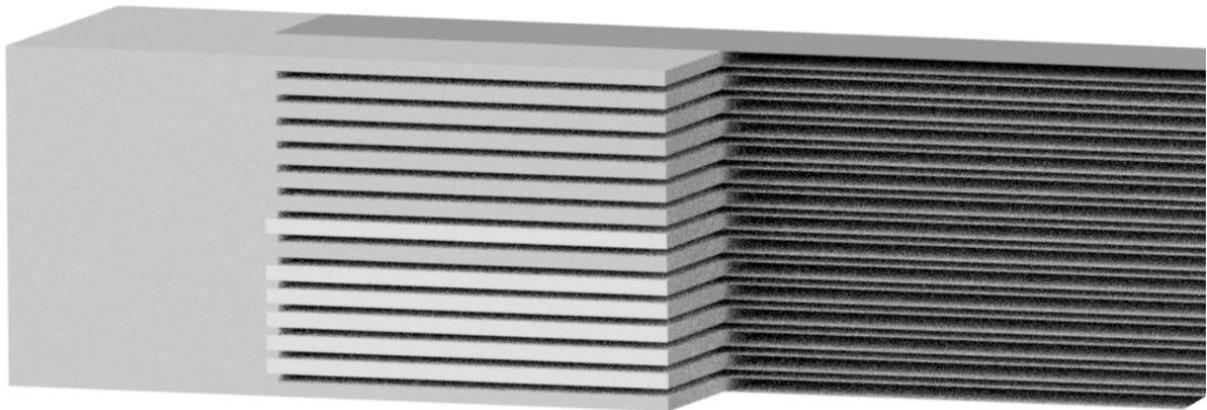
Figura 4.3 Se muestra el negativo generado a partir de la Caja Filtro, vistas en corte y detalles. Fuente: elaboración propia.

4.3.2 Cuerpo

En el Cuerpo del elemento combustible es donde se generan los canales paralelos por donde fluye el refrigerante, en la Figura 4.4 se muestra una porción del geometría global, en a) se aprecia los 15 canales que se forma y en b) se muestra el interior de los canales a través de una vista en corte del solido que representa al fluido.



a)



b)

Figura 4.4 Vista parcial de la geometría formada por el fluido en el Cuerpo y vista en corte de la sección interior. Fuente: elaboración propia

4.3.3 Boquilla

Para el último subconjunto del elemento combustible se extiende la entrada y la salida de la geometría, como se puede ver en la Figura 4.5. En a) se aprecia la geometría completa del fluido al interior de la Boquilla y el b) se muestra un corte a la mitad de la pieza y los cambios de sección que debe afrontar el fluido.

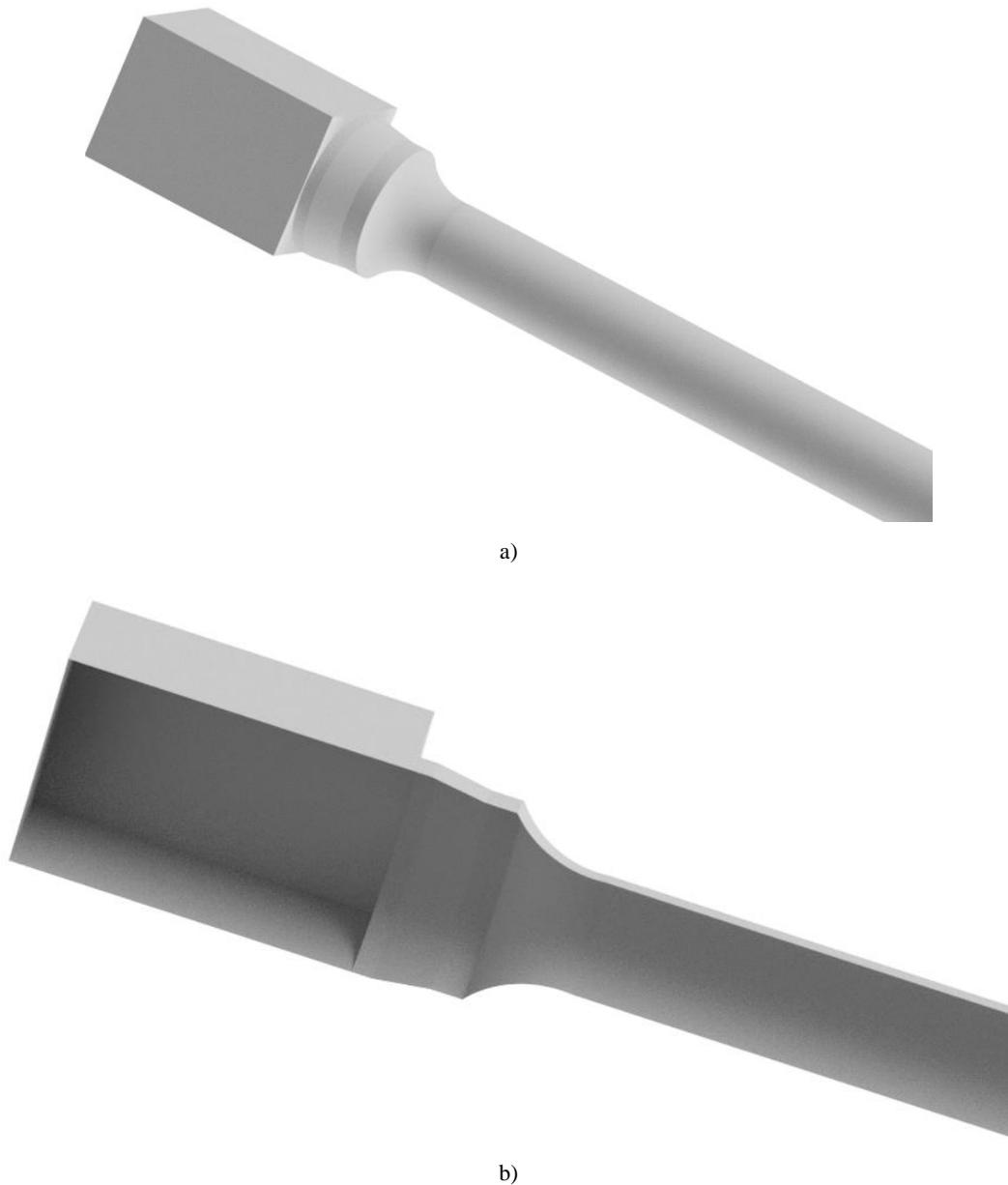


Figura 4.5 Se muestra el vaciado de la Boquilla y una vista en corte. Fuente: elaboración propia.

4.3.4 Elemento Combustible

Finalmente, se tiene el vaciado del elemento combustible completo, en la Figura 4.6 se presenta la geometría que se utilizará en el programa. En a) se muestra el elemento completo, en b) se expone una vista en detalle del cambio de sección entre la Caja filtro y el Cuerpo, en dicha zona se destaca una pared muy pequeña (1 [mm]). Y en c) se aprecia la sección interior del fluido y el cambio que sufre entre el Cuerpo y la Boquilla.

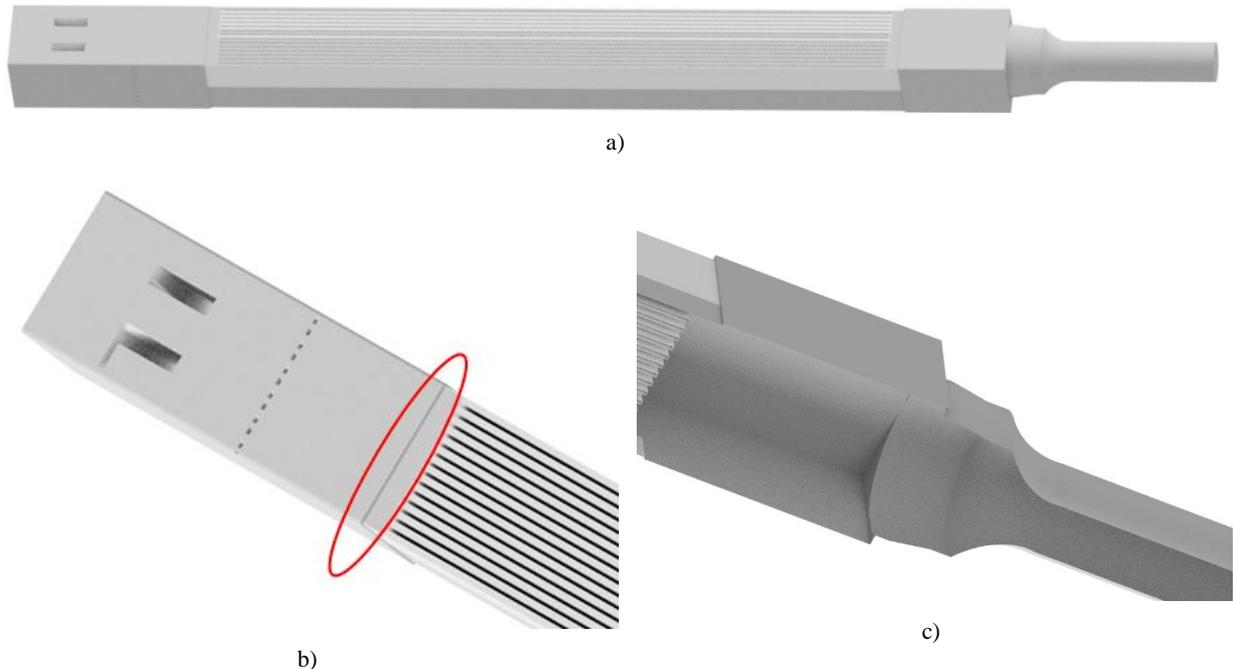


Figura 4.6 Negativo del elemento combustible completo y el detalle de los cambios de sección entre sus subconjuntos. Fuente: elaboración propia.

4.4 Mallado

La geometría del elemento combustible a trabajar se mantuvo sin modificaciones ni simplificaciones, convirtiéndose en una geometría de alta complejidad, debido a piezas como la placa de orientación, los travesaños, la placa filtro, canales delgados y cambios de secciones abruptas.

Para crear la malla, se utiliza el módulo Meshing del programa ANSYS, el cual ofrece una operación de mallado asistido para uso de CFD. EL método de mallar por defecto del programa corresponde a la generación de tetraedros para discretizar el volumen, sin embargo, se puede manipular por completo los métodos de mallado, esto permite la generación de hexaedros, prismas y pirámides.

La estrategia de mallado consiste en trabajar cada subconjunto por separado, para posteriormente crear la malla del elemento combustible completo. Se procede a presentar la malla creada:

4.4.1 Mallado Caja Filtro

Corresponde al primer volumen que se malla, la estrategia se basa en la construcción de tetraedros que cubren toda la geometría, en la Figura 4.7 se muestra la malla creada en la Caja Filtro, en a) se tienen el volumen global; luego en b) se muestra un corte en la zona de la placa filtro, esta corresponde a una zona de alta densidad de nodos, considerando que cada perforación tiene un diámetro de $4,6[mm]$, la distancia máxima entre nodos no supera los $0,5[mm]$ y se transforma en una geometría compleja; en c) se expone la cara correspondiente a la salida del fluido, se aprecia que al tener las esquinas redondeadas, con un radio de curvatura de $2[mm]$, la distancia entre nodos disminuye drásticamente comparada con el centro; y en d) se muestra en detalle la zona de los travesaños, en la cual se aprecia que en la unión de caras interiores aumenta la densidad de nodos y la geometría es compleja.

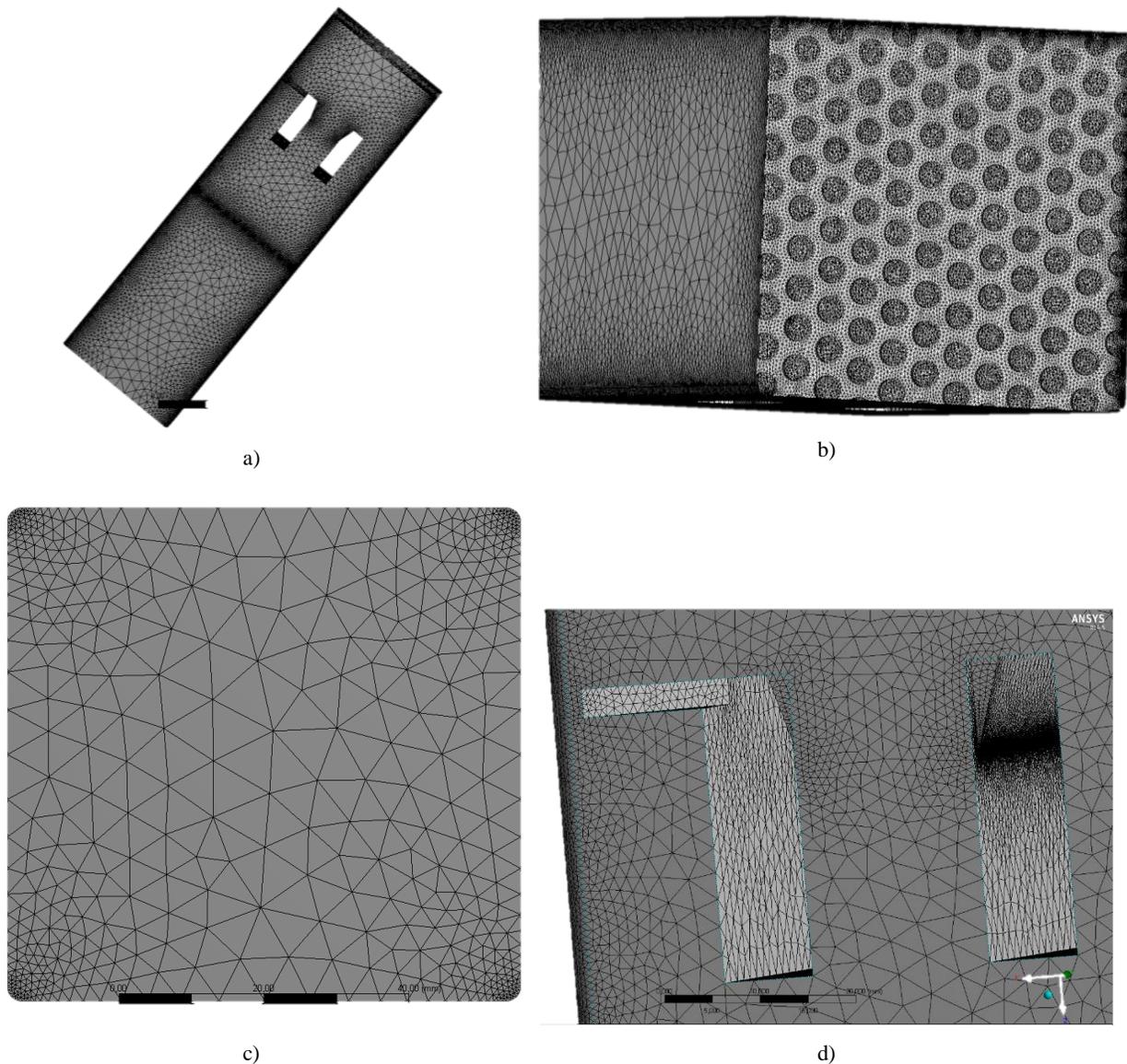
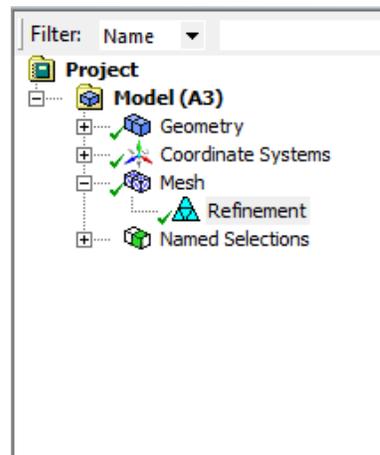


Figura 4.7 Malla creada en el subconjunto de la Caja Filtro, se muestran el cuerpo completo, vista en corte de la palca filtro, salida del fluido y detalle del travesaño. Fuente: elaboración propia.

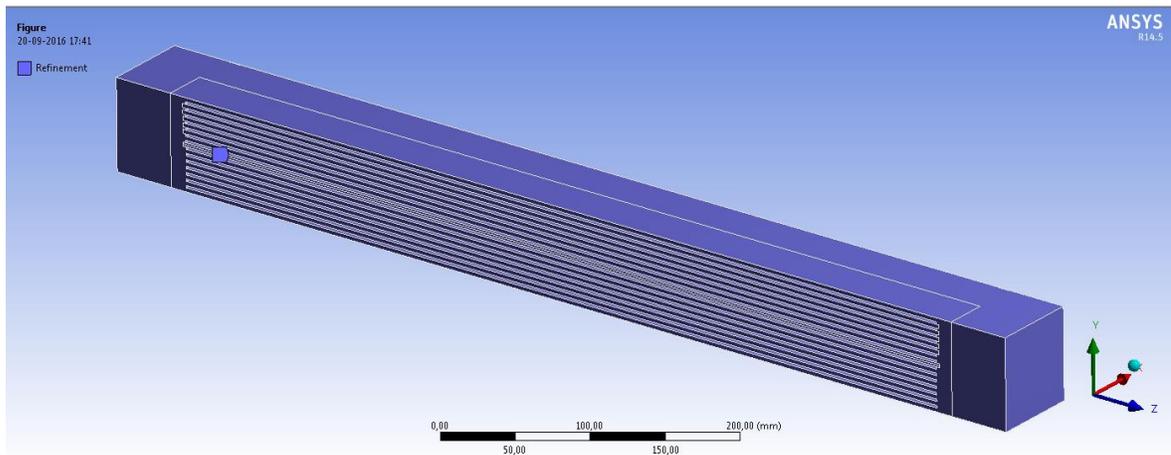
4.4.2 Mallado Cuerpo

Para mallar el Cuerpo del elemento combustible, se tuvo que cambiar la calidad en el mallado de la geometría y se debió implementar el método “Refinement”(refinamiento), como se muestra en la Figura 4.8. Es método corresponde a disminuir la distancia a la mitad entre nodos, en b) se exhiben las caras que fueron seleccionadas para ser refinadas, las cuales corresponden a los 15 canales que se forman más las paredes exteriores, entrada y salida del fluido.

Como producto se obtuvo el mallado que se ilustra en la Figura 4.9; en a) se muestra el volumen completo, aquí se aprecia la alta densidad de nodos y esto provoca que la mayor parte de la geometría se vea de color negro; en b) se muestra la vista de la cara lateral del cuerpo, se aprecia como la distancia entre nodos disminuye a medida que avanza desde la pared derecha hasta la zona de los canales; y en c) se exhibe la vista en corte del centro de los canales, se aprecia los elementos planos en forma de triángulos creados por el programa para mallar el volumen.



a)



b)

Figura 4.8 Método de mallado que se realiza en el Cuerpo. Fuente: elaboración propia.

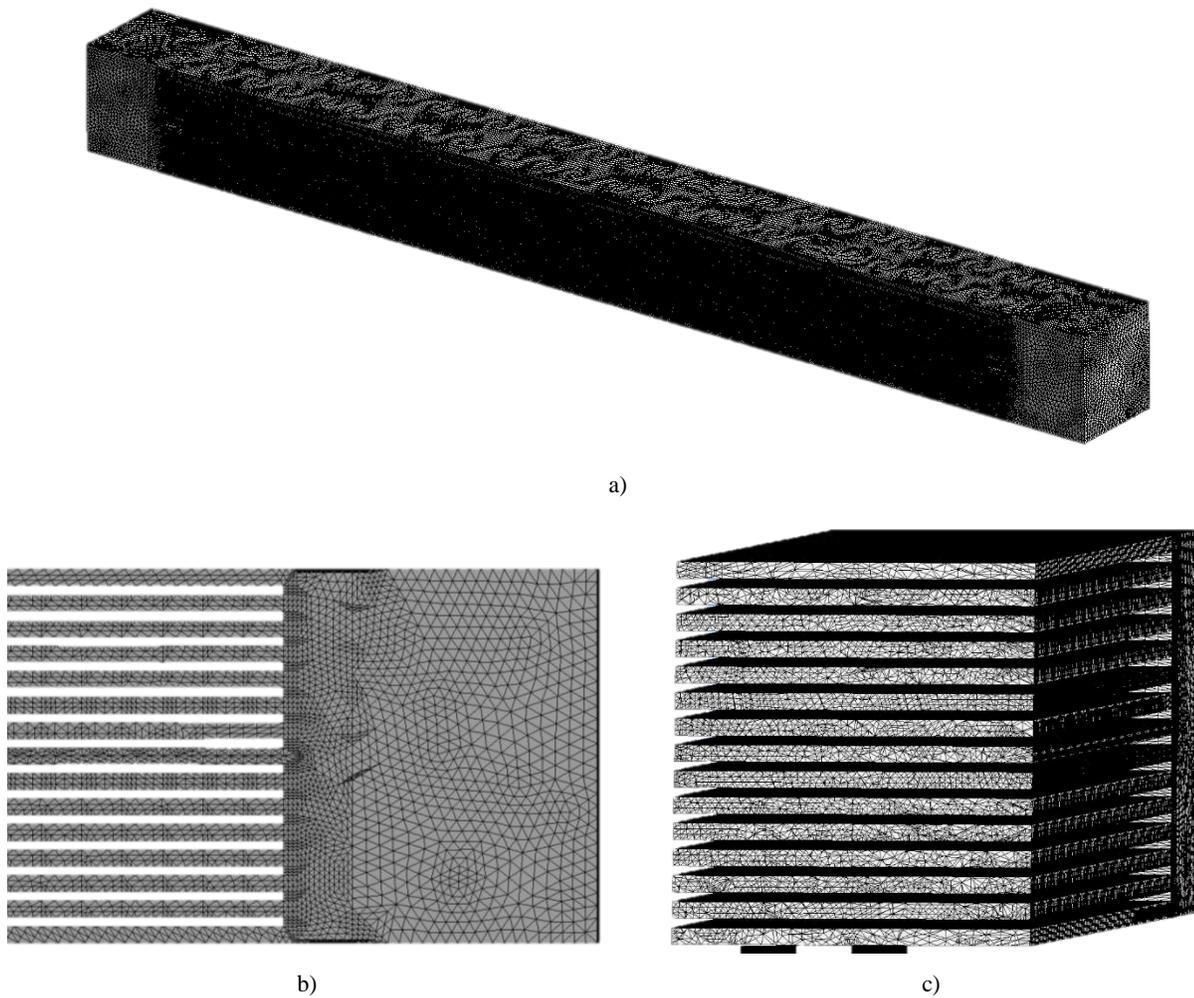


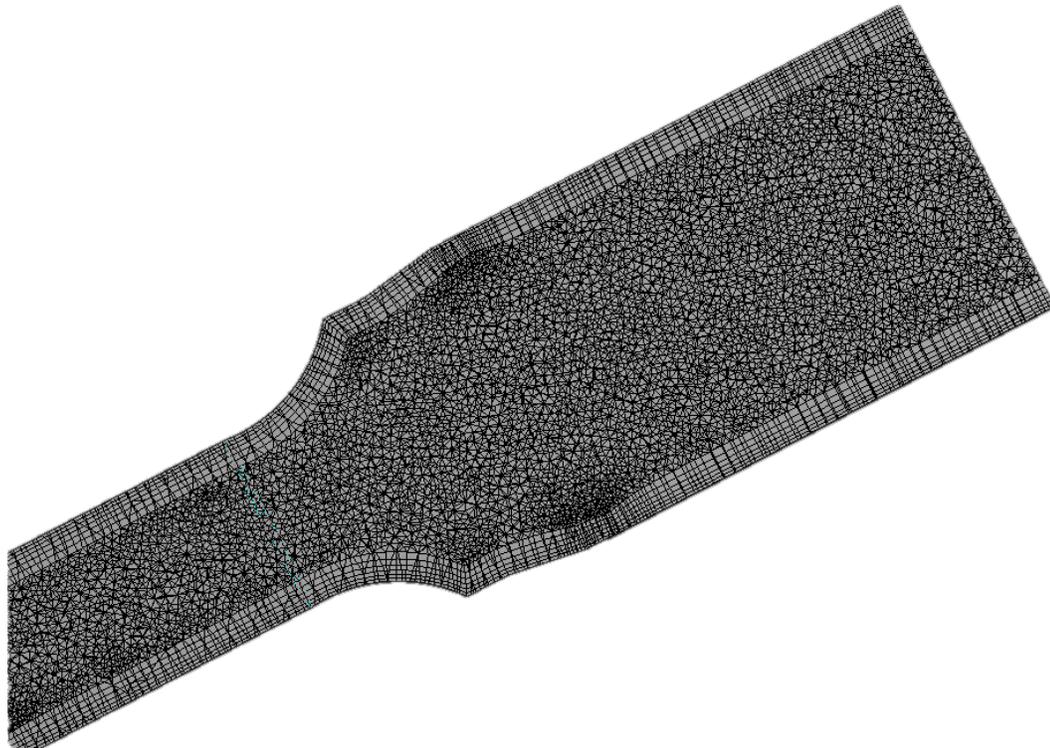
Figura 4.9 Malla creada en el Cuerpo, se muestra la vista de la geometría completa, detalle de la pared de las placas combustibles y la vista en corte del interior del volumen. Fuente: elaboración propia.

4.4.3 Mallado Boquilla

LA Boquilla representa el último tramo que recorre el fluido antes de salir, este subconjunto por sí solo no representa una alta complejidad, por lo que se puede implementar el método “Inflation” (Inflación). Este crea hexaedros en la caras seleccionadas, en la Figura 4.10 se tiene la parte a) que muestra la configuración del método, en esta se requiere ingresar el espesor del primer rectángulo, la cantidad de rectángulos a crear y la relación de crecimiento en el espesor de cada rectángulo ; y en b) se muestra el resultado de la aplicación del método, se aprecia que las paredes de la Boquilla están malladas con rectángulos y el centro con triángulos pequeños.

| Inflation | |
|---|-------------------------------------|
| Use Automatic Inflation | All Faces in Chosen Named Selection |
| Named Selection | Fluid |
| Inflation Option | First Layer Thickness |
| <input type="checkbox"/> First Layer Height | 0,6 mm |
| <input type="checkbox"/> Maximum Layers | 6 |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | 1,2 |
| Inflation Algorithm | Pre |
| View Advanced Options | No |

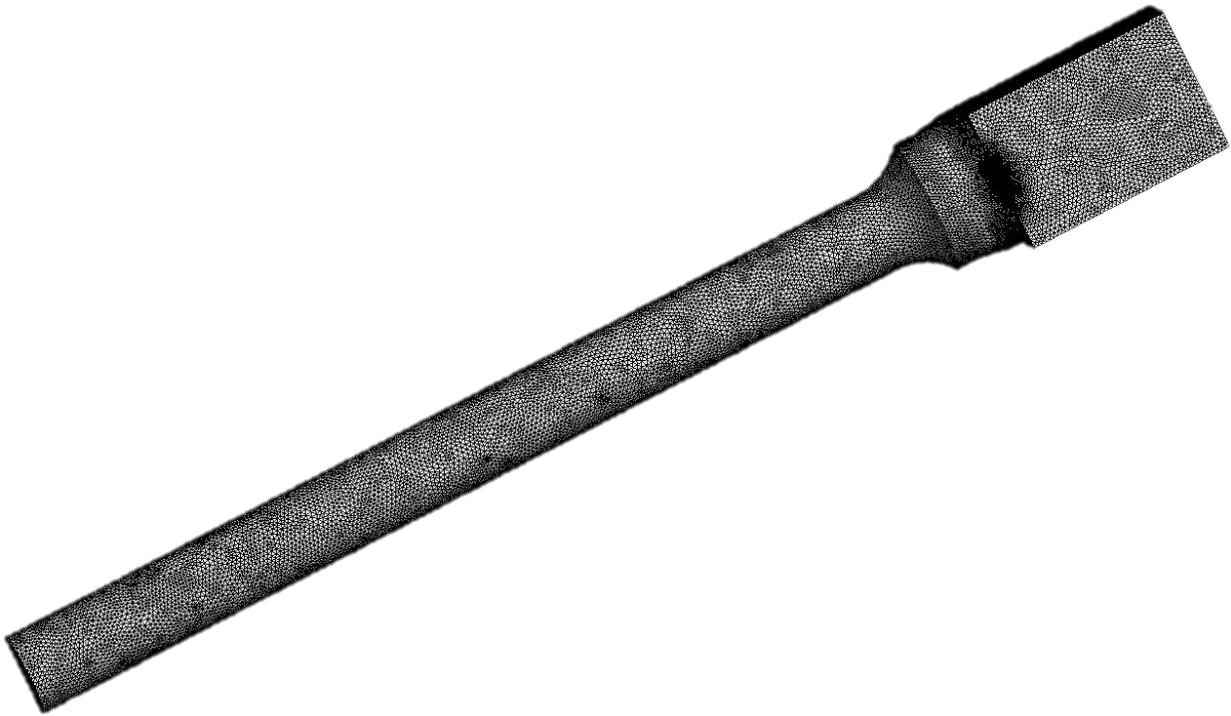
a)



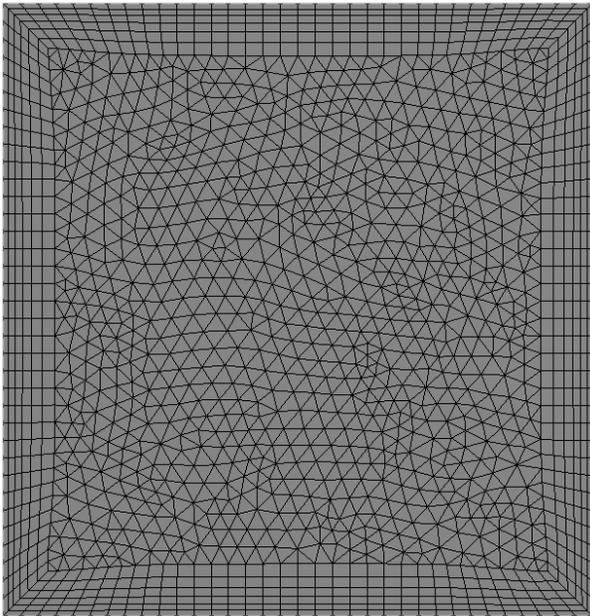
b)

Figura 4.10 Método "inflation" utilizado en la Boquilla y sus resultados. Fuente: elaboración propia.

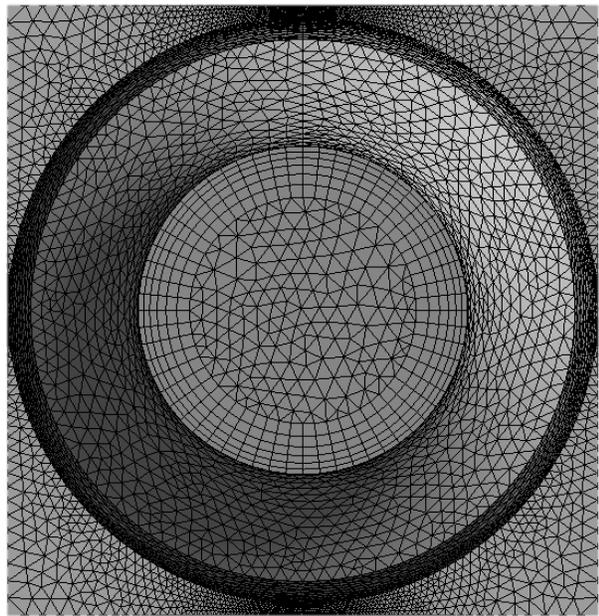
El mallado que se obtiene para la Boquilla completa se muestra en la Figura 4.11, en esta se presenta en a) el volumen completo, se distingue que en la zona de cambio abrupto de geometría -cuadrada a circunferencia- existe un aumento de la densidad de nodos; esto se caracteriza por tonos más negros en el volumen. En b) se muestra la vista frontal de la entrada del fluido, se distingue el método "inflation" que se aplica sobre el volumen, al ver las paredes. Y en c) se tiene una vista trasera que muestra la salida del fluido y en donde se aprecia los distintos cambios de geometrías.



a)



b)



c)

Figura 4.11 La malla creada en la Boquilla, se muestra el volumen completa, la vista de la entrada y la salida del flujo. Fuente: elaboración propia.

4.4.4 Mallado Elemento Combustible

El último proceso de mallado corresponde al que se realiza sobre el vaciado del elemento combustible. Este representa una mayor complejidad para el programa, lo que se traduce en una mayor cantidad de nodos a utilizar y en consecuencia mayores requerimientos computacionales.

Se opta por optimizar el rendimiento computacional, para asegurar la convergencia de la malla y se omiten los métodos manuales utilizados en los subconjuntos anteriores. Se utiliza el mallado creado por defecto, que trabaja en base a tetraedros.

Finalmente, se crea la malla en el volumen de trabajo, los resultados se muestran en la Figura 4.12. En a) se presenta la geometría completa, en esta se aprecia zonas más oscuras donde la densidad de nodos es mayor y corresponden al Cuerpo, placa filtro y travesaño; en b) se muestra un detalle de los elementos creados en la Caja Filtro; en c) se tiene la vista en corte al centro de la Caja Filtro, donde se aprecia los travesaños y la placa filtro con el aumento de nodos correspondiente; en d) se exhibe un corte y detalle de la placa filtro, donde se hace notorio el aumento en la cantidad de nodos; y en e) se presenta la transición entre la Caja Filtro, dicha pared tiene 1 [mm] de espesor y la distancia entre nodos es menor.

El resto de la geometría se presenta en detalle en la Figura 4.13, aquí se tiene a) y b) que muestran el mallado generado en los canales, corresponden a la pared externa y al centro respectivamente; en c) se muestra la transición entre el Cuerpo y la Boquilla, dicha pared también posee un espesor de 1 [mm]; en d) se muestra la malla creada en el exterior de la Boquilla y en e) se presenta una vista en corte en el centro de la Boquilla, si se compara con el mallado del subconjunto solo, se aprecia que no existen rectángulos en sus paredes.

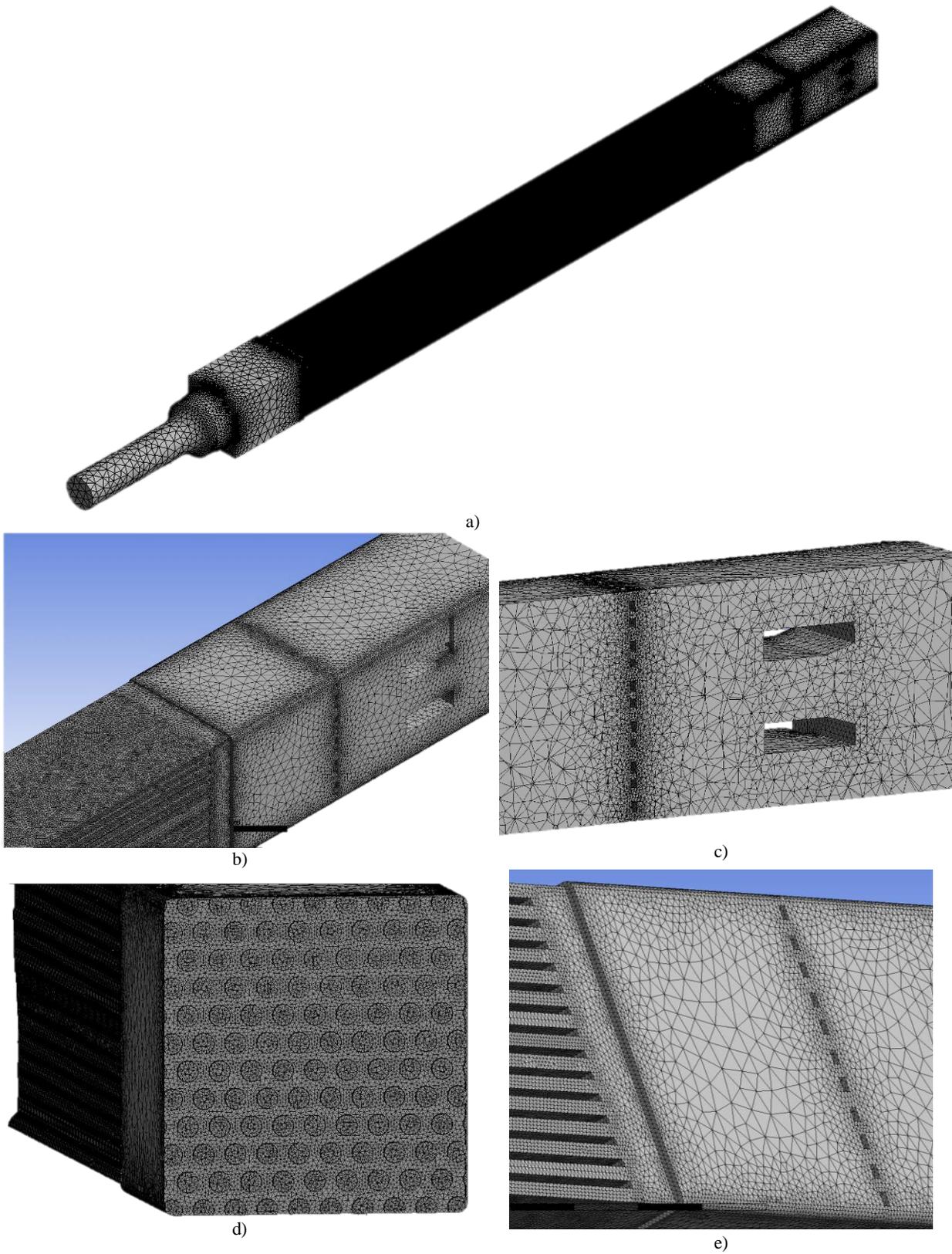
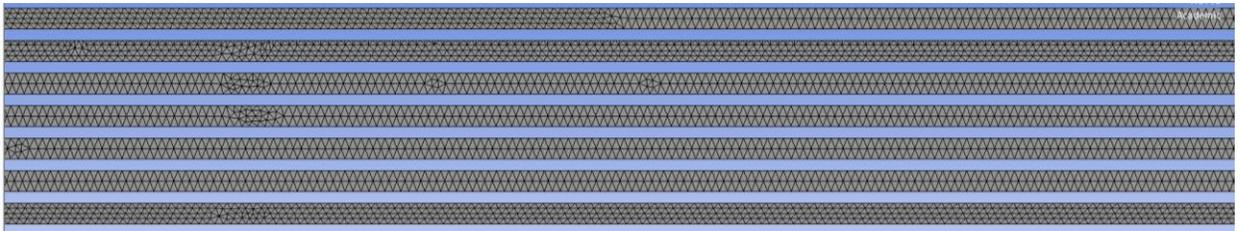
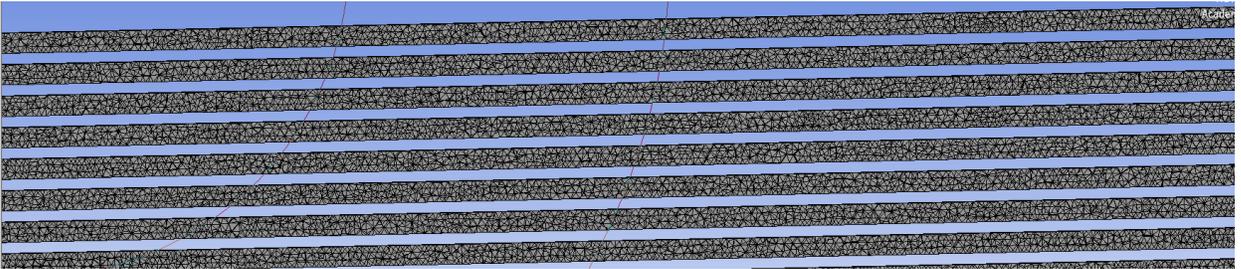


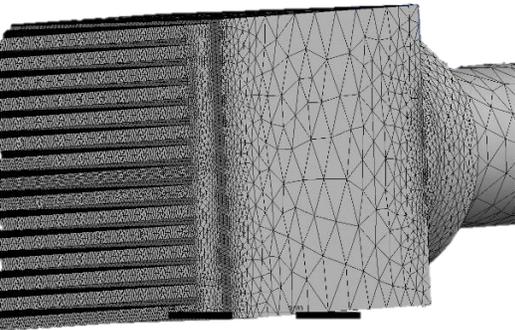
Figura 4.12 Mallado del elemento combustible, se muestra el volumen de control completo. Fuente: elaboración propia.



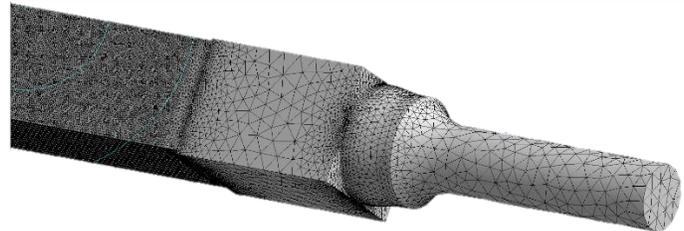
a)



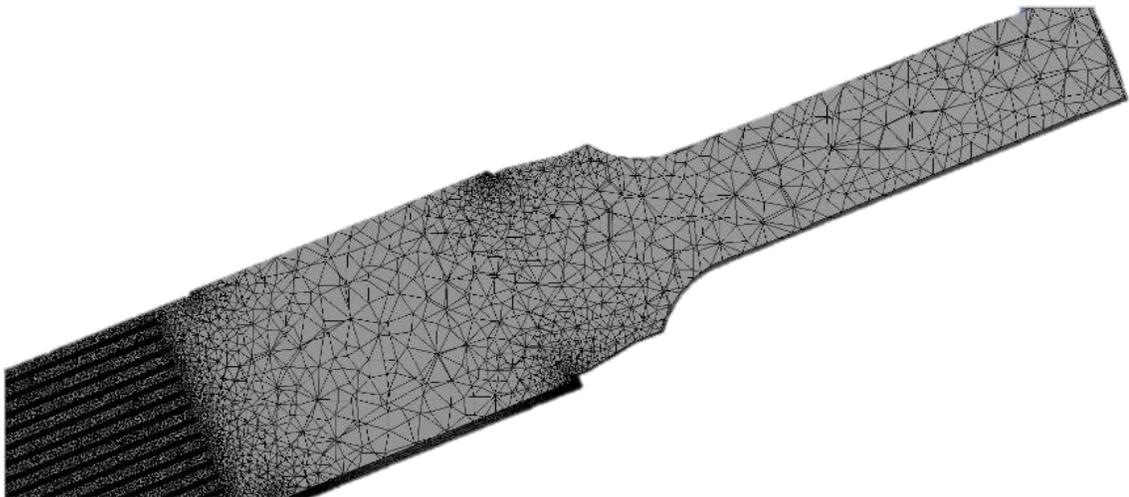
b)



c)



d)



e)

Figura 4.13 Detalles del mallado del elemento combustibles. Fuente: elaboración propia.

4.5 Comparación y Validación del Mallado

En esta sección se caracteriza el mallado con datos numéricos y se utilizan los métodos antes expuestos para verificar la calidad del mallado.

El programa ANSYS Meshing que se utilizó para crear el mallado, entrega la estadística de la cantidad de nodos y elementos requeridos para mallar el volumen de interés, en la Tabla 4.2 se tiene la cantidad de nodos para cada subconjunto, el que posee más nodos es el Cuerpo, lo cual se condice con su mayor tamaño con respecto a los otros dos. Si se considera la suma de los subconjuntos y se compara con el elemento combustible, se advierte que están en el mismo orden de magnitud.

El área de ingeniería nuclear se ha encargado de realizar simulaciones CFD para distintos reactores, en este contexto se estudia un elemento combustible con otra geometría, pero de envergadura similar, en esta investigación se trabaja con 1.420.199 nodos [20]. En el mismo ámbito, pero distinto objetivo, se estudia la distribución de refrigerante en la entrada del núcleo del reactor SMART, este corresponde a un reactor de potencia de 330[MWt]. Para realizar dicho estudio se requirieron 43,8 millones de nodos.

Tabla 4.2 Datos relevantes sobre la malla de los subconjuntos y el elemento combustible

| | Caja Filtro | Cuerpo | Boquilla | Suma | Elemento Combustible |
|------------------|-------------|--------------|-----------|-----------|----------------------|
| Nodos | 532.127 | 1.131.873 | 374.781 | 2.038.781 | 2.291.414 |
| Elementos | 2.872.707 | 5.081.630 | 1.428.361 | 9.382.698 | 10.622.360 |
| Arista más corta | 0,001 [mm] | 0,00003 [mm] | 0,6 [mm] | ----- | 0,00003 [mm] |

. Fuente: elaboración propia.

En la sección 3.6 se describen dos métodos para calificar la calidad de la malla, los cuales se aplican en el mallado obtenido en cada uno de los subconjuntos y en el elemento combustible. A continuación, se verifica la calidad de la malla:

4.5.1 Método Skewness

Para este método es preciso tener presente la Figura 3.25, en la cual se tiene que para valores de 0,8- 0,95 una calidad aceptable, para 0,5-0,8 una calidad buena, para 0,25-0,5 una calidad muy buena y para 0-0,25 calidad excelente de malla.

Para la Caja Filtro, se aprecia en la Figura 4.14 que la mayor concentración de elementos se encuentra en el rango 0,13-0,25, la cantidad de elementos que está por sobre 0,5 representa el 0,1% del total. Además, el promedio estadístico de todos los elementos es 0,23. Por lo que se toma la calidad de malla entre muy buena y excelente, siendo satisfactoria para realizar las simulaciones.

En el Cuerpo se presenta la distribución de elementos que se muestra en la Figura 4.15, para este subconjunto la mayor parte de los elementos se distribuyen entre 0,0-0,5, la cantidad de elementos

que está por sobre 0,8 no supera el 1% del total de elementos. También, se tiene que el promedio corresponde a 0,35. En consecuencia, se cataloga la calidad de la malla como muy buena.

Sobre el subconjunto de la Boquilla, se tiene la distribución mostrada en el a Figura 4.16, en esta se aprecia que existen tetraedros y hexaedros, ambos están por debajo de 0,8 y la mayor concentración de elementos se concentra entre 0,0-0,38. Se agrega a lo anterior, el promedio del total de elementos, el cual corresponde a 0,22. Por consiguiente, la calidad de la malla entra en la categoría de muy buena a excelente.

Para el elemento combustible, se presenta la distribución de la métrica para los elementos en la Figura 4.17. Se aprecia que la mayor concentración se encuentra en torno a 0,25, el 99% de los elementos esta debajo de 0,8 y el promedio es 0,23. Por lo que, la calidad de malla está en la categoría de muy buena a excelente.

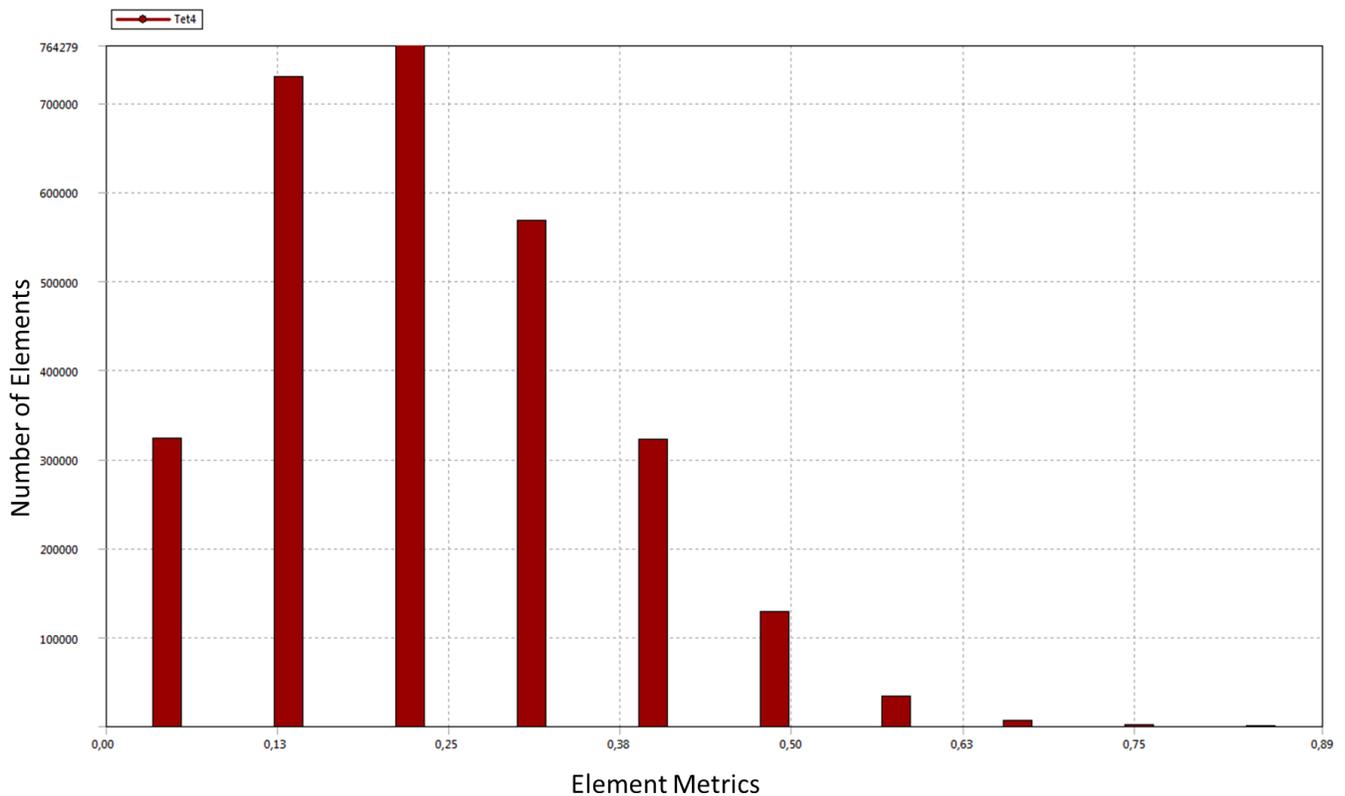


Figura 4.14 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla de la Caja Filtro, según el método Skewness. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

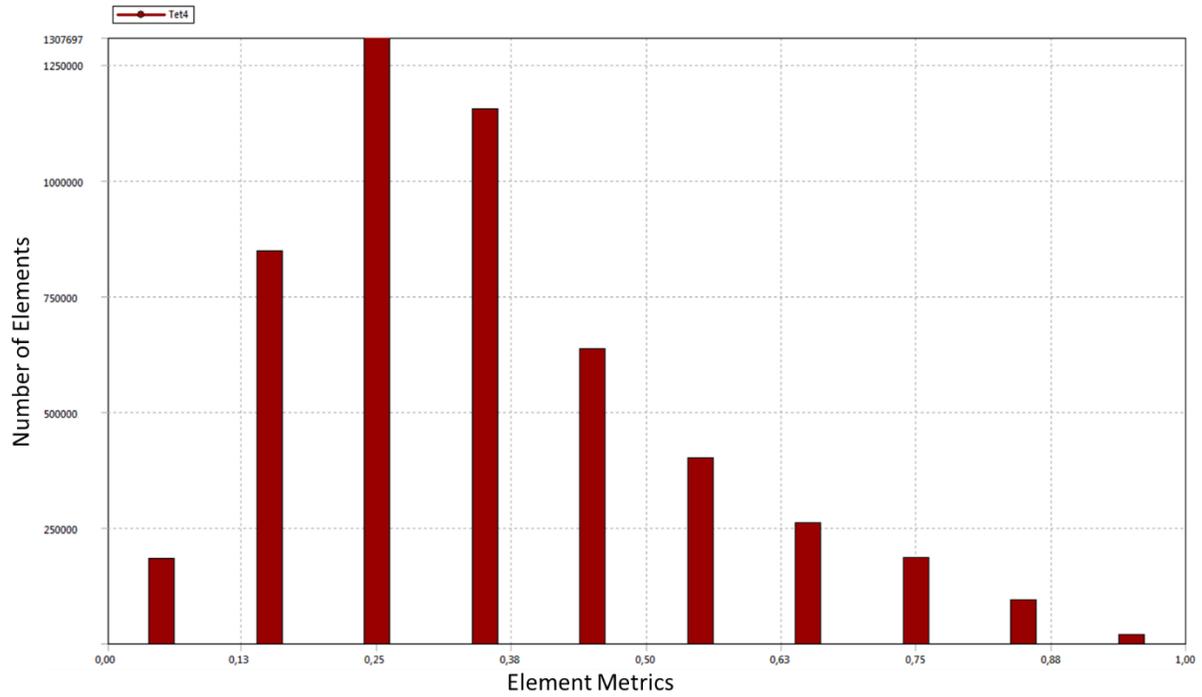


Figura 4.15 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla de la Cuerpo, según el método Skewness. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

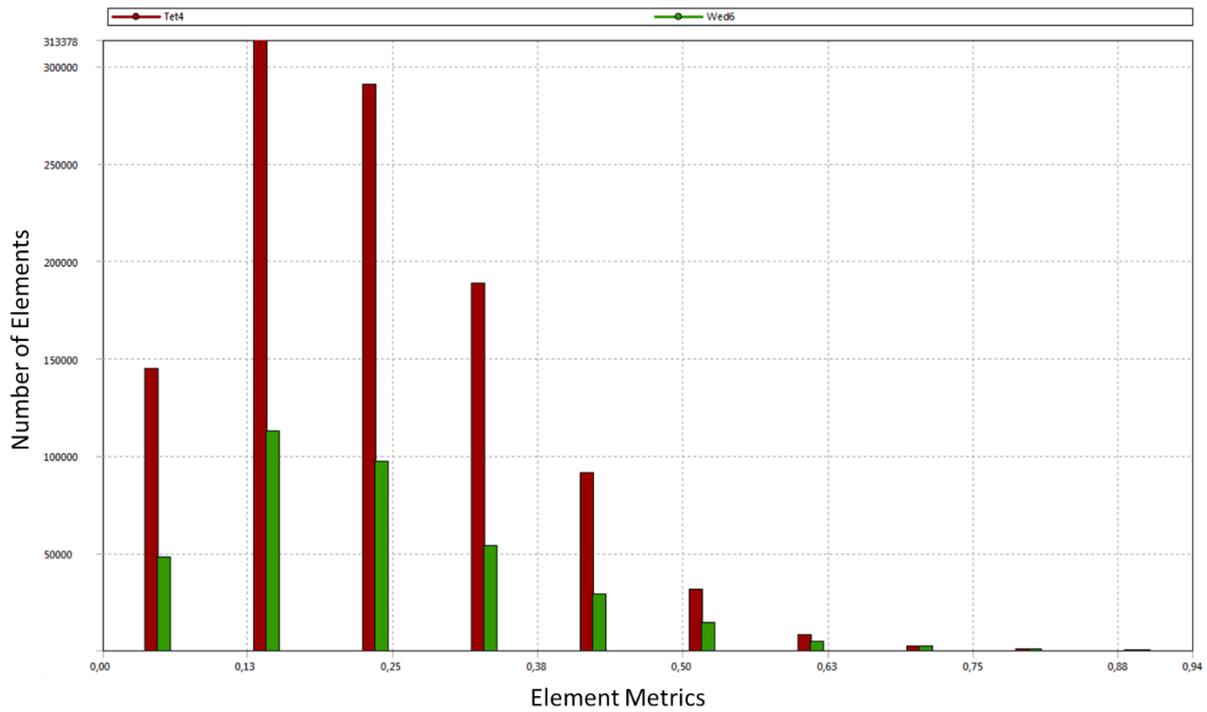


Figura 4.16 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla de la Boquilla, según el método Skewness. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

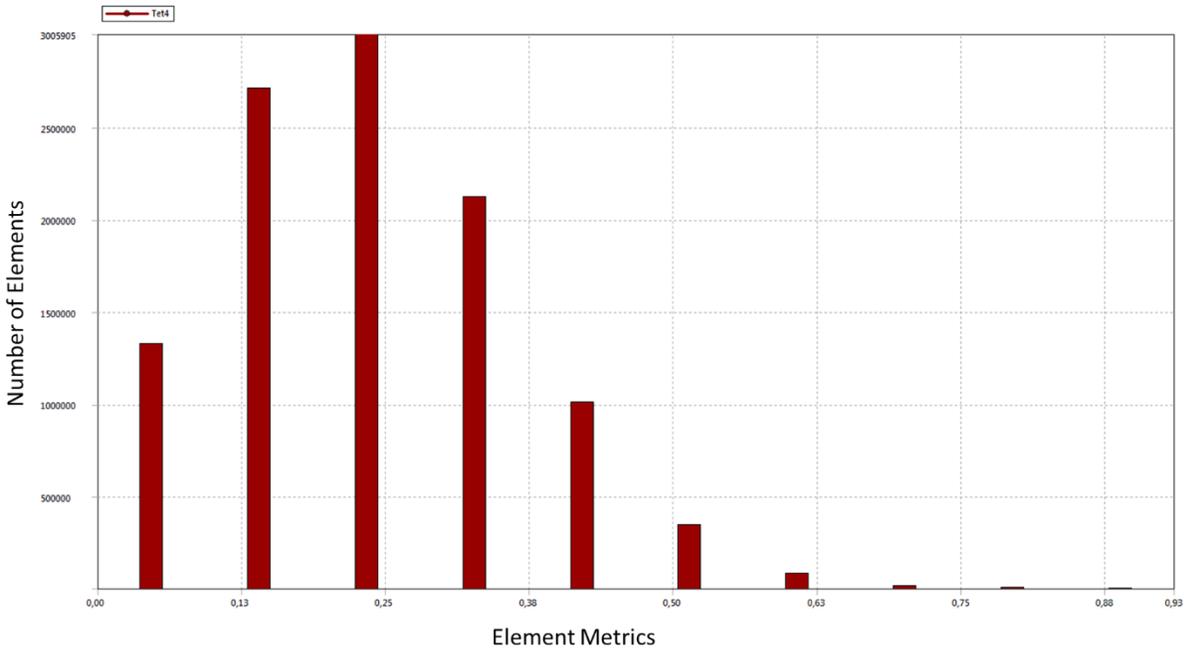


Figura 4.17 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla del elemento combustible, según el método Skewness.

Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

4.5.2 Método Aspect Ratio

Este método se explicó en la sección 3.6.6, para trabajar con una calidad de la malla aceptable en la resolución del problema CFD, se requiere que el indicador esté cerca de 1 y que no supere la relación máxima de 5:1. Así asemeja geometrías homogéneas como los son el triángulo equilátero y el cuadrado.

Para la Caja Filtro, la distribución de valores se muestra en la Figura 4.18, se aprecia que la mayor cantidad se concentra cerca de 1,17 y promedio de 1,8. Estos valores están dentro de la relación máxima, por lo que es una malla aceptable para el problema.

En el Cuerpo se obtuvo la distribución que se muestra en la

Figura 4.19, en esta se aprecia que la concentración de elementos está en torno a 2,0 y se agrega que el promedio corresponde a 2,1. Con lo que se infiere que la malla para el método Aspect Ratio es aceptable.

Para el subconjunto correspondiente a la Boquilla se generó el gráfico que se muestra en la Figura 4.20, en el cual se aprecia que la distribución tanto para tetraedros como para hexaedros se encuentra en torno a 2,0. Lo que se condice con el promedio, el cual es 2,02. Como consecuencia, se establece que la calidad de la malla es apta para resolver el problema.

Finalmente, para el elemento combustible se tiene la distribución de elementos que se presenta en la Figura 4.21, de esta se extrapola que sobre el 95% de los elementos tiene un aspect ratio en torno 1,5. Además, el promedio entregado por el programa corresponde a 1,8. Con estos datos se asegura la calidad de la malla para solucionar el problema.

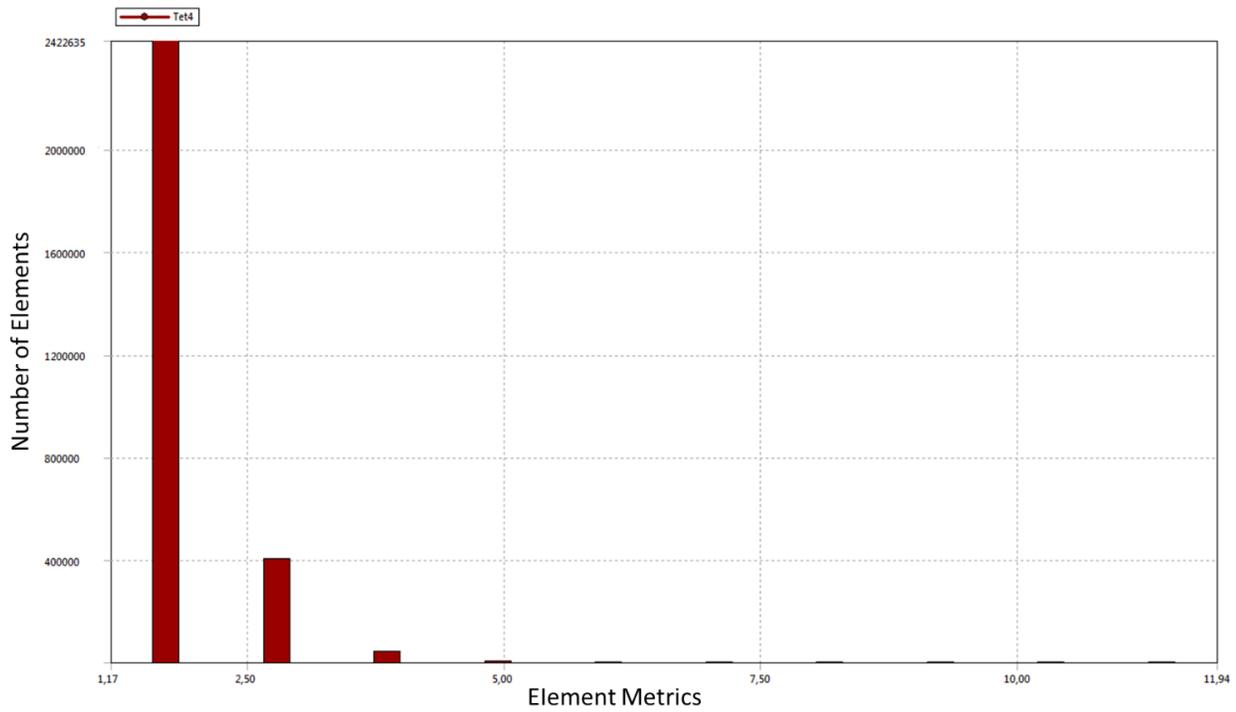


Figura 4.18 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla del Caja Filtro, según el método Aspect Ratio. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

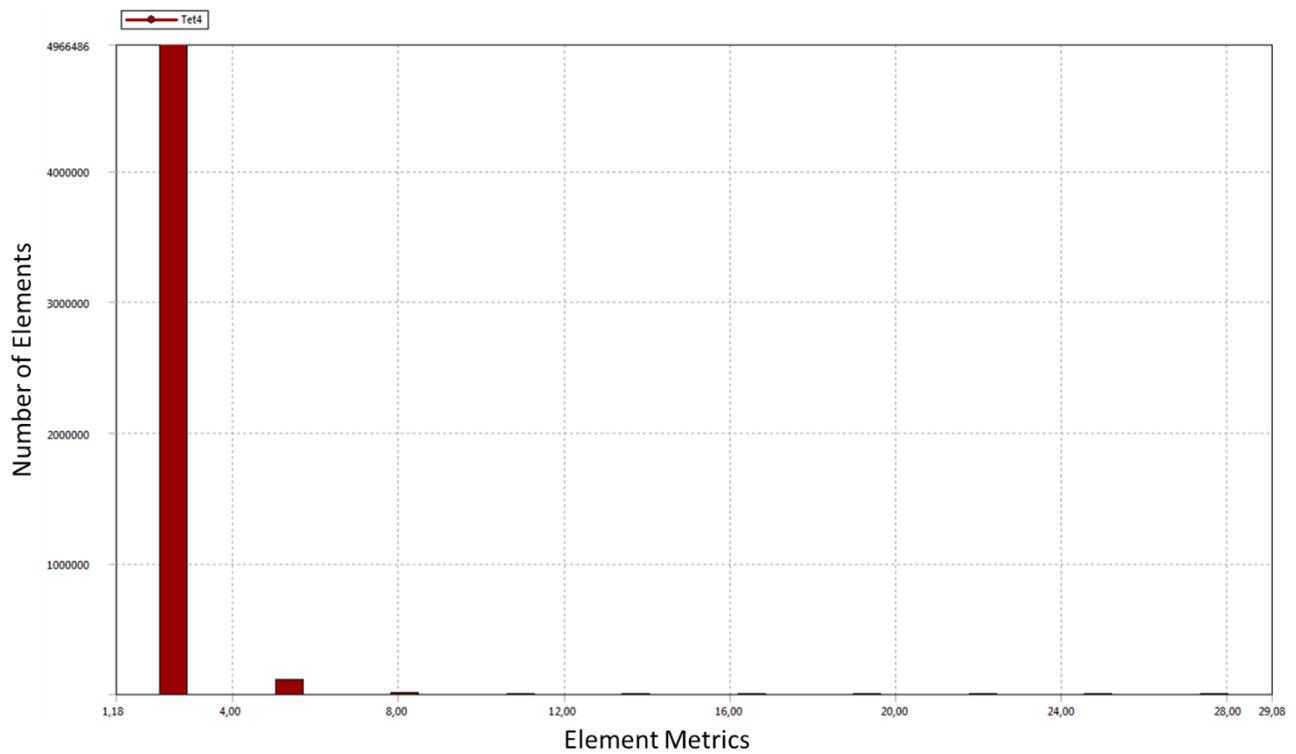


Figura 4.19 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla del Cuerpo, según el método Aspect Ratio. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

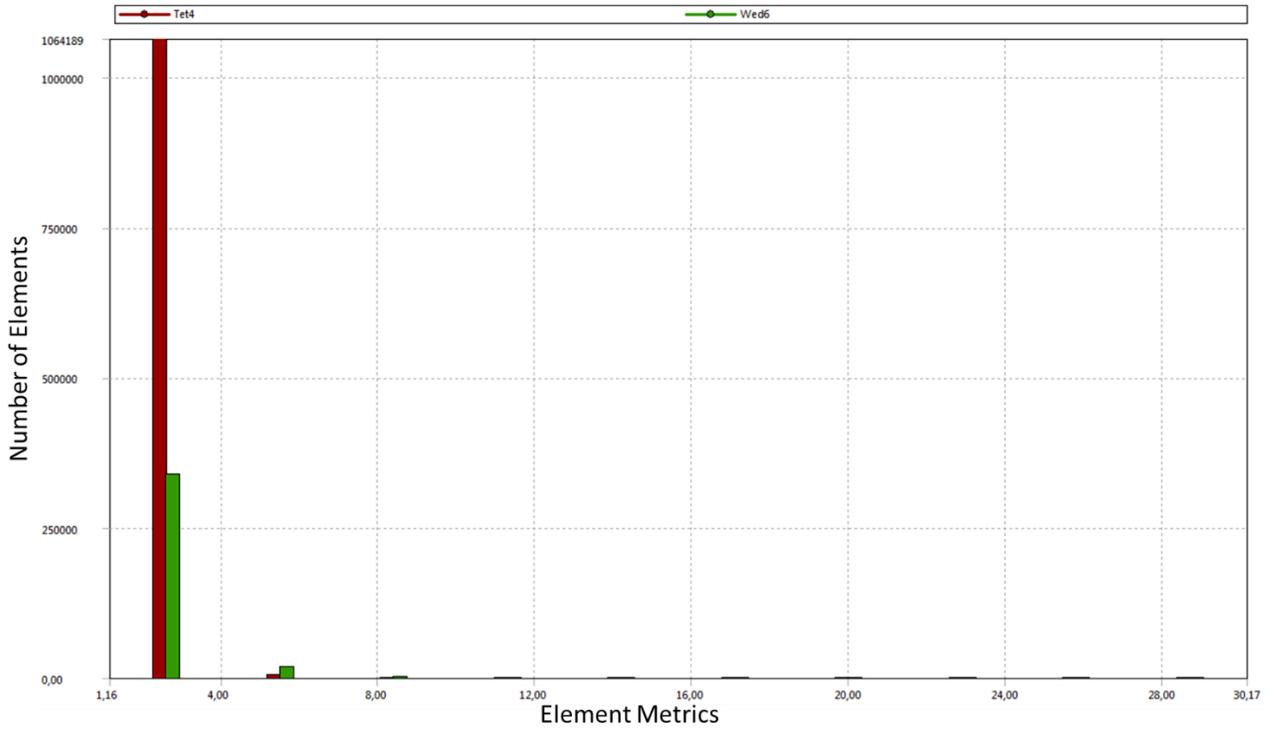


Figura 4.20 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla del Boquilla, según el método Aspect Ratio. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

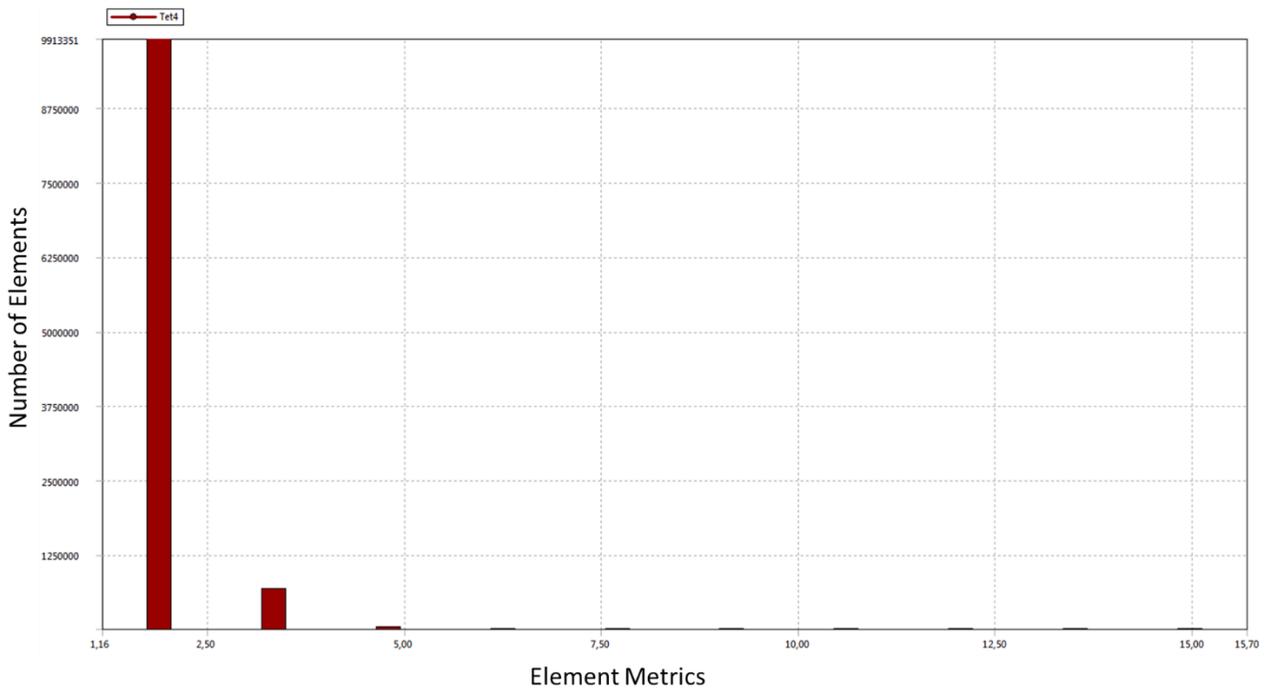


Figura 4.21 Gráfico con la distribución de los elementos de la malla del elemento combustible, según el método Aspect Ratio. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

4.6 Configuración

El programa a utilizar corresponde a ANSYS Fluent versión 17.1 con licencia académica de 4 núcleos. Este se utilizará en un computador facilitado por el Departamento de Ingeniería Mecánica, el cual corresponde a un Dell Precision T1700, con un procesador Intel® Xeon® E3-1200, 16 GB de memoria RAM y sistema operativo Windows 7 Professional.

El problema se trabaja en régimen estacionario, asumiendo que el elemento combustible está sumergido a la piscina. Además, como se impuso el régimen laminar, se utiliza el modelo *Laminar*. Se utiliza como condición de borde de entrada la velocidad a estudiar (ver Tabla 4.3) y como condición de borde de salida se utiliza presión 0 [Pa]. Para el fluido de trabajo se designa agua líquida a 20°C y una densidad de 0.998[kg/m³].

El método de solución para el acoplamiento de presión y velocidad será SIMPLEC (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations-Consistent*), este asegura una convergencia más rápida para problemas laminares [18]. Para la discretización espacial de la presión se utilizará PRESTO!, la discretización espacial del gradiente se seleccionará *Least Square Cell Based* y para el momento se utilizará *Second Order Upwind*.

Tabla 4.3 Rango de velocidades a evaluar.

| # | Velocidad. [m/s] |
|----|------------------|
| 1 | 0.01 |
| 2 | 0.05 |
| 3 | 0.10 |
| 4 | 0.15 |
| 5 | 0.25 |
| 6 | 0.35 |
| 7 | 0.55 |
| 8 | 0.75 |
| 9 | 0.95 |
| 10 | 1.15 |

Fuente: Elaboración propia.

4.7 Simplificación del Problema

Antes de realizar todas simulaciones explicadas en la sección anterior (en total 40), se buscará una simplificación del problema, que pueda generar la reducción del tiempo de iteración necesario para la convergencia de la solución. Para llevar esto a cabo, se tomará la Boquilla, puesto que es el subconjunto con el menor número de nodos, lo que se traduce en menos tiempo de cálculo.

La estrategia de simplificación se basa en la simetría de la geometría, por lo que se simulará completa, mitad y un cuarto de la geometría de la Boquilla, las cuales se muestran en la Figura 4.22, en a) el medio y en b) el cuarto de elemento. Se utilizará como condición de entrada la velocidad nominal (0,349 [m/s]).

Para que esta estrategia sea válida, se requiere que la caída de presión entre las tres geometrías debe ser similar, se aceptará hasta un máximo de 10% de diferencia entre la geometría original y las simplificadas.

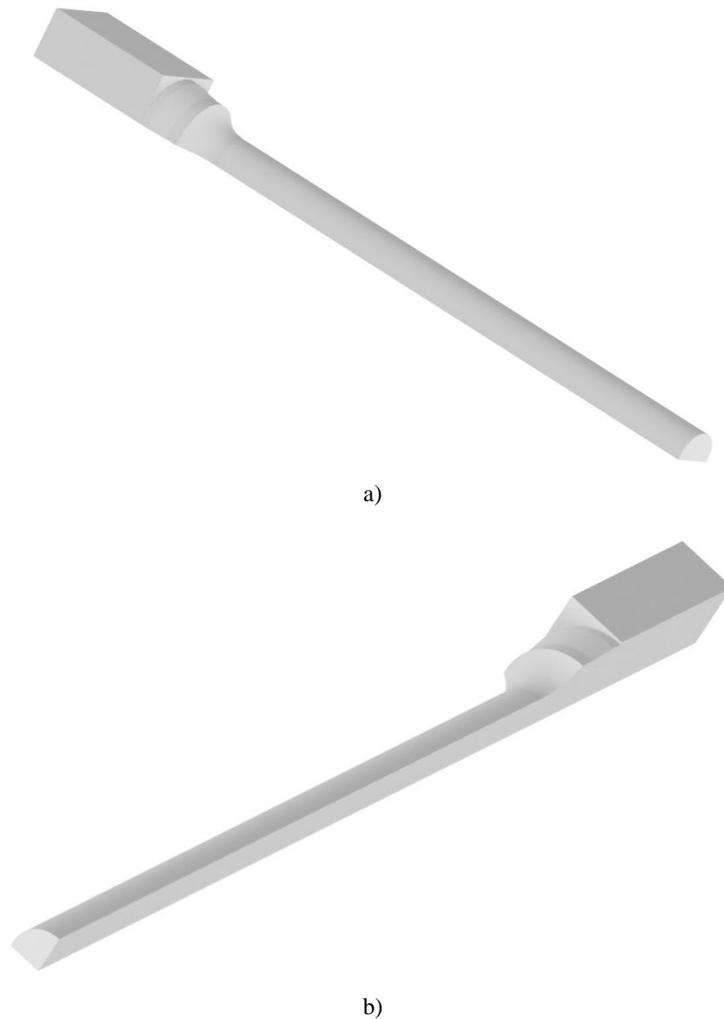


Figura 4.22 Geometrías simplificadas de la Boquillas. Fuente: elaboración propia, generada en Inventor.

4.8 Simulaciones

La estrategia de simulación corresponde a tomar cada uno de los subconjuntos e ingresar cada una de las 10 velocidades seleccionadas, que se muestran en la Tabla 4.3; es decir, el orden de trabajo será:

- 1° Caja filtro: se ingresan las 10 velocidades, se obtienen las caídas de presión y se crea la curva de caída de presión en función de las velocidades.
- 2° Cuerpo: se ingresan las 10 velocidades, se obtienen las caídas de presión y se crea la curva de caída de presión en función de las velocidades.
- 3° Boquilla: se ingresan las 10 velocidades, se obtienen las caídas de presión y se crea la curva de caída de presión en función de las velocidades. Y, Finalmente
- 4° Elemento combustible: se ingresan las 10 velocidades, se obtienen las caídas de presión y se crea la curva de caída de presión en función de las velocidades.

Posteriormente, se suma la caída de presión entre Caja Filtro, Cuerpo y Boquilla y se creará un gráfico que mostrará total de la caída de presión en función de la velocidad.

4.9 Validación

La validación se realizará con tres métodos distintos. Primero, se comparará con los datos computacionales del estudio realizado en CFX y que se describió en la sección 3.3.1. Como segundo método de comparación se utilizarán las medidas experimentales expuestas en la sección 3.3.2, de las cuales los principales objetos a utilizar son la Tabla 3.3 y la Figura 3.10.

Finalmente, se utilizarán los cálculos analíticos realizados en la sección 4.2. Con estos se comparará cada uno de los subconjuntos a simular, es decir, se analizará la diferencia de la caída de presión en la Caja Filtro, Cuerpo y Boquilla con los cálculos analíticos y las simulaciones. Y, de manera global, la caída de presión en el elemento combustible.

4.10 Resultados de Simulaciones

En el presente capítulo se plasman y explican los resultados obtenidos para las simulaciones en los distintos casos planteados, es decir, para ver la simplificación del problema, la pérdida de carga para las velocidades establecidas en los subconjuntos y en el elemento combustible. El objetivo global de esta sección, corresponde a agrupar los resultados en un gráfico que permita caracterizar hidráulicamente al elemento combustible.

4.11 Resultados Analíticos

Como se explicó en la sección 4.2, se realizó un cálculo analítico en los distintos subconjuntos para cada una de las velocidades seleccionadas, los resultados se muestran en la Tabla 4.4, en esta se calcula la Caja Filtro, Cuerpo y Boquilla, luego se suman y se obtiene la pérdida de presión total para cada velocidad.

Tabla 4.4 Resultados de la pérdida de presión mediante cálculo analítico

| | Velocidad | Filtro | Cuerpo | Boquilla | Suma |
|----|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| # | [m/s] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] |
| 1 | 0,01 | 0,3 | 34,7 | 0,5 | 36 |
| 2 | 0,05 | 8,9 | 173,6 | 13,4 | 196 |
| 3 | 0,1 | 37,1 | 347,2 | 53,6 | 438 |
| 4 | 0,15 | 86,6 | 517,4 | 118,9 | 723 |
| 5 | 0,25 | 258,2 | 864,6 | 332,1 | 1455 |
| 6 | 0,35 | 508,4 | 1211,8 | 652,4 | 2373 |
| 7 | 0,55 | 1272,6 | 1906,3 | 1614,3 | 4793 |
| 8 | 0,75 | 2478,1 | 2600,7 | 3004,7 | 8084 |
| 9 | 0,95 | 4022,0 | 3295,1 | 4823,6 | 12141 |
| 10 | 1,15 | 5974,9 | 3989,6 | 7071,0 | 17036 |

Fuente: elaboración propia.

4.12 Resultados Simplificación

Para las geometrías que se detallaron en Figura 4.22, se realiza las simulaciones con la velocidad nominal y los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 4.5, de esta se extrapola que la diferencia de presión entre el elemento combustible difiere un 27% para la mitad de la geometría y un 26% para el cuarto de geometría.

Tabla 4.5 Diferencia de presión para las distintas geometrías en la Boquilla

| Velocidad | Elemento Completo | Medio elemento | Cuarto elemento |
|-----------|-------------------|-----------------|-----------------|
| [m/s] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] |
| 0,349 | 1317 | 1038 | 1046 |

Fuente: elaboración propia.

Más allá de la diferencia de presión, también se pueden estudiar líneas de corrientes para las tres geometrías, las cuales se muestran en la Figura 4.23, se presenta en a) las líneas para el elemento completo, se evidencia que las líneas sufren recirculación en el cambio de sección y aguas abajo las líneas se mueven de manera serpenteante; en b) se presenta la mitad de la geometría, en esta se tiene que la pared donde se corta la geometría tiene la propiedad de *simetría* y confina el movimiento de las líneas de corriente; la limitación de movimiento se ve de manera más clara en c), aquí se tiene dos paredes con propiedad de *simetría* y se puede notar que las líneas son forzadas a seguir de manera recta guiadas por la pared central.

Se atribuye al fenómeno antes expuestos, como el motivo principal de la diferencia entre los resultados obtenidos entre las geometrías simplificadas y la original. Por lo que, se descarta trabajar con la versión simplificada del volumen de control. Además, si se revisa el elemento combustible, se aprecia que la Caja filtro no permite simetría por la pieza de orientación instalada sobre el travesaño.

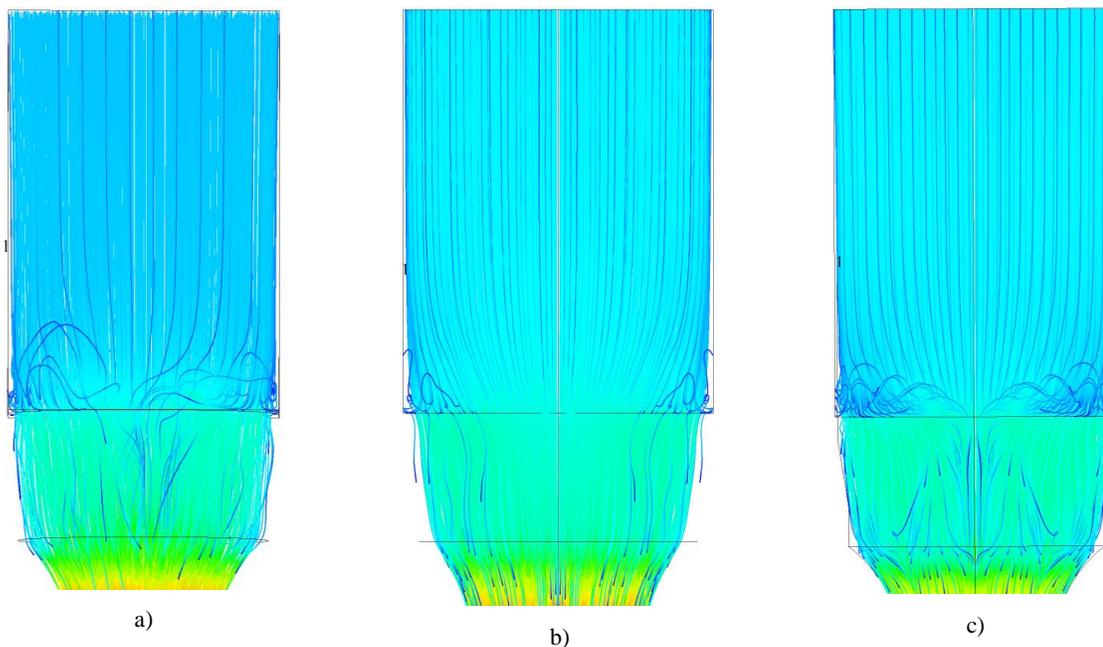


Figura 4.23 Líneas de corriente a través de las geometrías de estudio. Fuente: elaboración propia, generadas en ANSYS.

4.13 Resultados de la Simulación

Se presentan los resultados obtenidos para las distintas simulaciones, en este caso se exponen a través de tablas y diagramas de contorno que muestra la diferencia de presión entre la entrada y la salida, se explicitará la distribución de pérdida de presión dentro de cada subconjunto, el elemento combustible y, finalmente, se juntan todos los resultados en una sola tabla y un gráfico que muestra la pérdida de presión para las 10 velocidades distintas.

4.13.1 Caja Filtro

En la Figura 4.24 se entiende como ocurre la distribución de la pérdida de presión en la Caja Filtro para la velocidad nominal, en a) se muestra la diferencia de presión entre la entrada y la salida del volumen de control, se evidencia que la pieza que afecta de manera predominante corresponde a la placa filtro y luego siguen los travesaños; en b) se muestran líneas de corriente, se aprecia que la pieza de orientación y los travesaños generan recirculación en el flujo, seguido por una estrangulación súbita en los orificios de la placa filtro, donde se alcanza las mayores velocidades; y en c) se tiene un plano que atraviesa transversalmente a la placa filtro y se genera un diagrama de contorno con las presiones, de este se puede interpretar que los travesaños generan un flujo desigual que entra a la placa filtro.

Para las simulaciones que se realizaron en la Caja Filtro, se obtuvieron las pérdidas de presión que se muestran en la Tabla 4.6, en donde se aprecia que para una velocidad baja, la caída de presión es casi nula, con la tendencia de aumento según aumenta la velocidad.

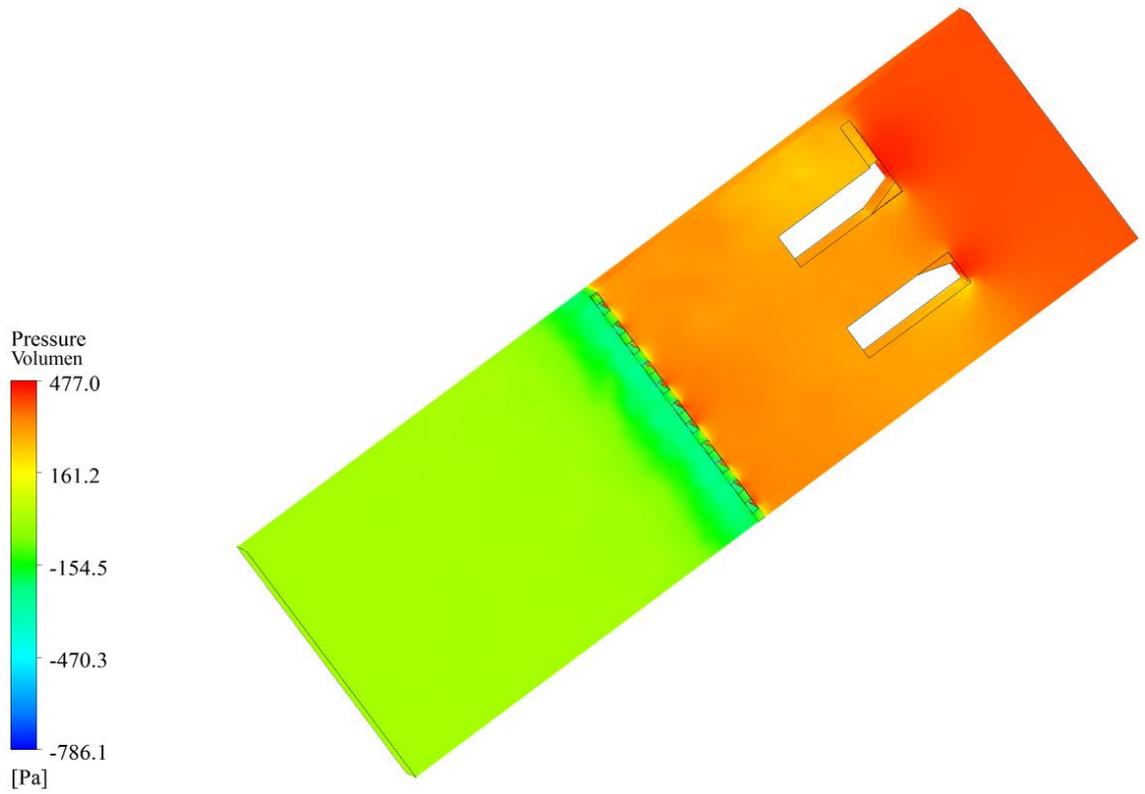
Para la simulación computacional de cada velocidad se requirió de aproximadamente 10 horas de cálculos computacionales, para que la solución convergiera. Lo que en total se traduce en 100 horas de uso computacional para obtener los resultados.

4.13.2 Cuerpo

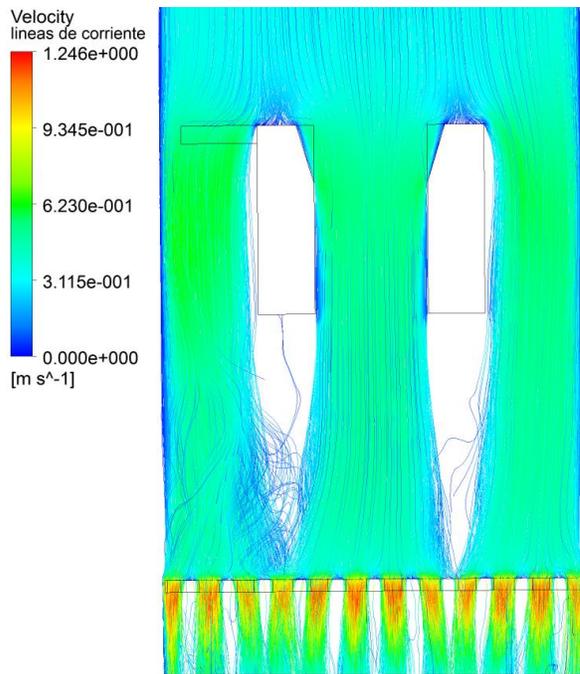
En la Figura 4.25 se muestran los diagramas de contorno de la diferencia de presión entre la entrada y la salida para la velocidad nominal, se tiene para a) la caída de presión a través de un canal de refrigeración y en b) un plano transversal a los calanes por donde circula el refrigerante. En estos diagramas se puede apreciar que la caída de presión ocurre de manera gradual, como se espera que ocurra en fluido que circula en placas paralelas. También, se aprecia que la entrada y salida de canales son zonas donde el refrigerante sufre mayores pérdidas de presión debido a los cambios de geometrías y obstáculos existentes.

Para las simulaciones que se realizaron en el Cuerpo, se obtuvieron las pérdidas de presión que se muestran en la Tabla 4.6, de esta se puede extrapolar que la caída de presión aumenta a medida que crece la velocidad, lo que se respalda con el modelo analítico antes expuestos y lo que físicamente debiese ocurrir.

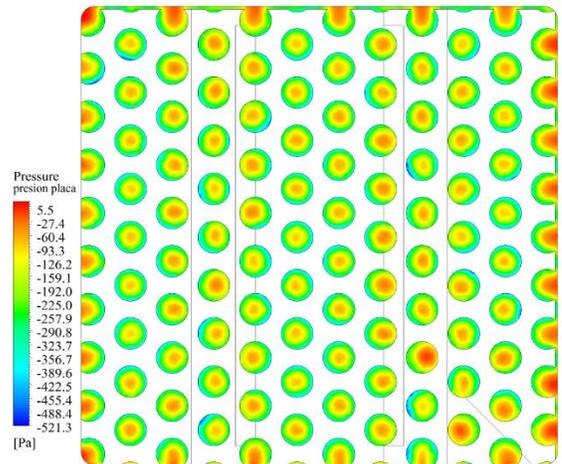
Para la simulación computacional de cada velocidad se requirió de aproximadamente 15 horas de cálculos computacionales, para que la solución convergiera. Lo que en total se traduce en 150 horas de uso computacional para obtener los resultados.



a)

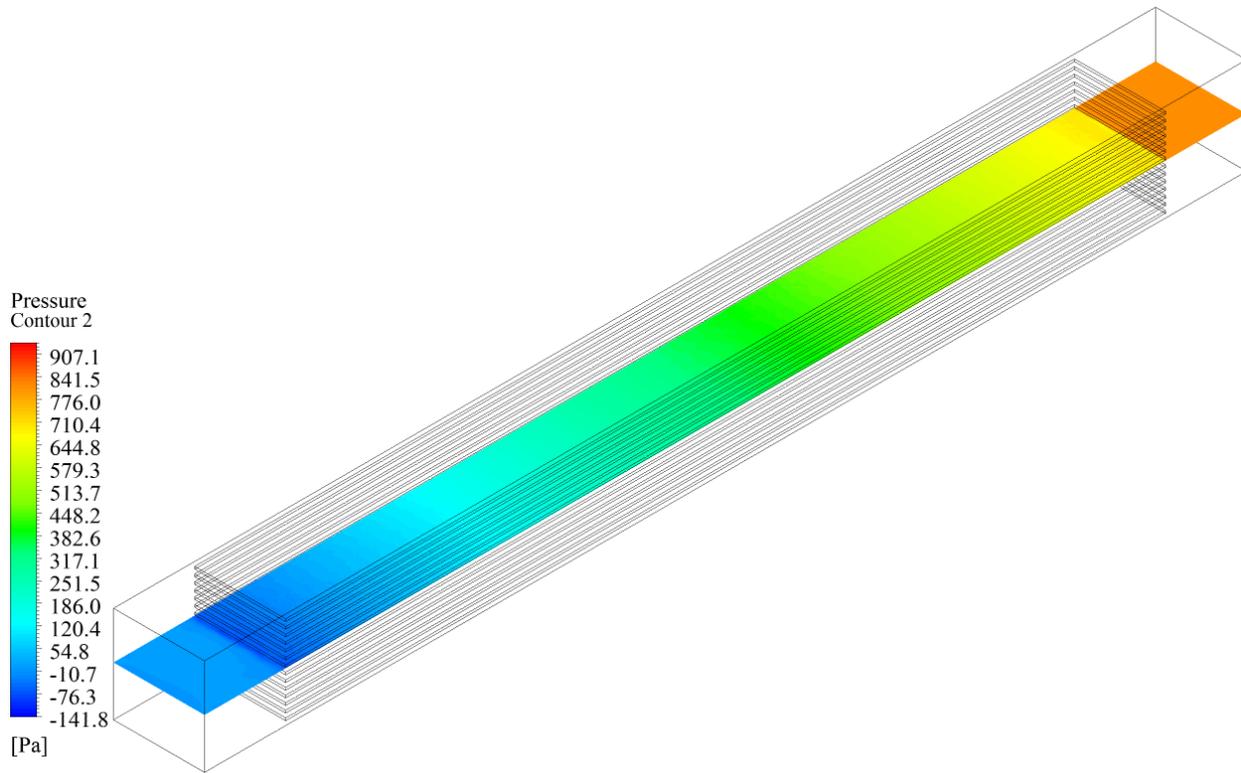


b)

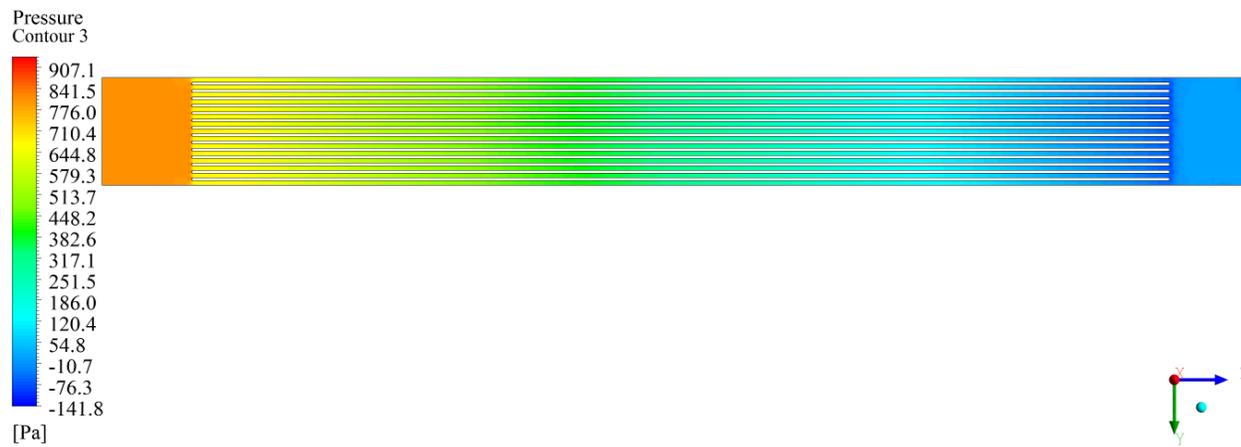


c)

Figura 4.24 Distintos resultados para la velocidad nominal la Caja Filtro, en a) se tiene la diferencia de presión entre la entrada y la salida del volumen de control. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.



a)



b)

Figura 4.25 Distintos resultados para la velocidad nominal en el Cuerpo, en a) y b) se muestra la diferencia de presión entre la entrada y la salida del volumen de control. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

4.13.3 Boquilla

En la Figura 4.26 se muestran lo que ocurre con el fluido en el interior de la Boquilla para la velocidad nominal, en a) se muestra la diferencia de presión entre la entrada y la salida del volumen de control, se tiene un diagrama de contorno en un plano que está al centro de la geometría, en este se puede apreciar que la mayor pérdida de presión ocurre en la estrangulación; en b) se muestran líneas de corrientes, donde se aprecia que existe recirculación del fluido en la zona de cambio de geometría; y en c) se tiene un diagrama de contorno en un plano que está en la transición de geometría (cuadrada a circular), en donde se corrobora la recirculación del refrigerante.

Para las simulaciones que se realizaron en la Boquilla, se obtuvieron las pérdidas de presión que se muestran en la Tabla 4.6, se aprecia que en las velocidades altas, ocurre un salto de pérdida de presión mayor para un cambio de velocidad constante.

Para la simulación computacional de cada velocidad se requirió de aproximadamente 6 horas de cálculos computacionales, para que la solución convergiera. Lo que en total se traduce en 60 horas de uso computacional para obtener los resultados.

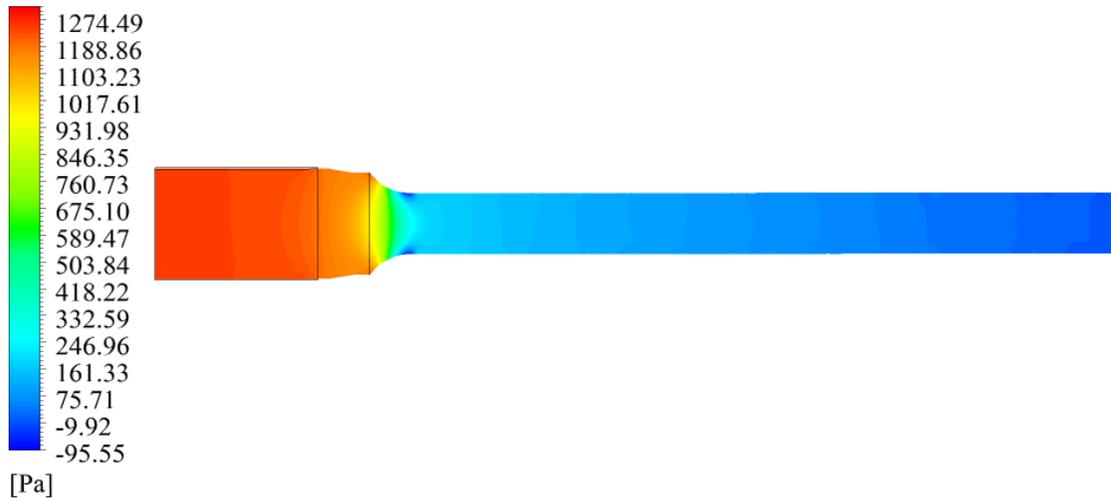
4.13.4 Elemento Combustible

En la Figura 4.27 se muestran resultados de la caída de presión para velocidad nominal en el elemento combustible, en a) se tiene un diagrama volumétrico que muestra la distribución de la pérdida de presión en volumen completo, se evidencia que la placa filtro, la entrada de las placas combustibles y las estrangulación de la Boquilla son las que generan el mayor impacto; en b) se tiene un plano que atraviesa un canal del refrigerante, en donde se aprecia la caída de presión gradual en la placas paralelas y el impacto de la Boquilla; y en c) se expone un plano que se dispone de manera transversal a los canales de refrigeración, en esta se puede ver cómo afectan los travesaños en la baja de presión.

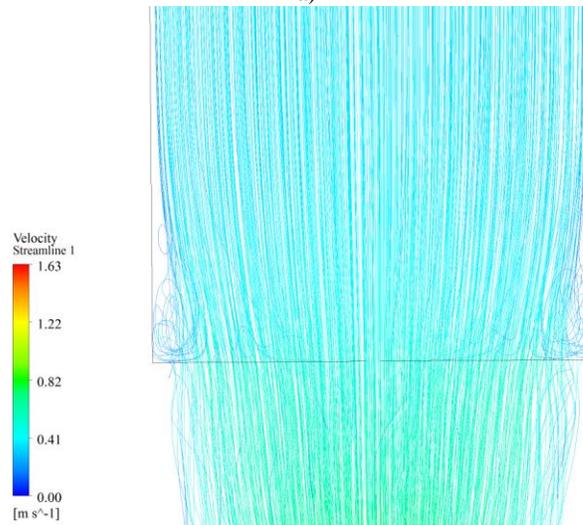
También se caracteriza el elemento combustible mediante líneas de corriente, las cuales se muestran en Figura 4.28, en esta se aprecia como los travesaños y la pieza de orientación, obstaculizan el camino del fluido, ver a); luego el fluido debe enfrentar la placa filtro, la cual provoca otra alteración en el flujo. Cuando el refrigerante se encuentra con el Cuerpo, ver b), sufre un estancamiento, debido a que las partículas impactan con las placas combustibles. Luego, el agua debe abandonar los canales, ver c), aquí las partículas sufren una expansión, provocando un aporte en la pérdida de presión. Y, finalmente, el fluido debe pasar a través de la Boquilla, ver d), en donde las partículas impactan con un cambio de geometría abrupto y luego son comprimidas en la reducción de diámetro.

Finalmente, se realizaron las simulaciones para la geometría completa del elemento combustible, los resultados obtenidos se sintetizan en la Tabla 4.6, se puede notar que a partir de la velocidad nominal existe un aumento progresivo en la caída de presión, es decir, que para variaciones iguales de velocidad no ocurre un aumento igual de caída de presión.

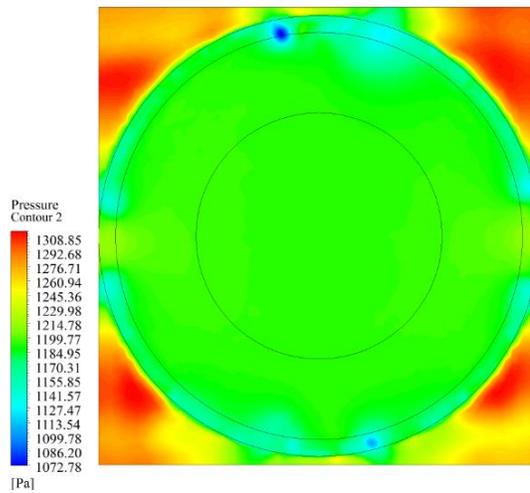
Para la simulación computacional de cada velocidad se requirió de aproximadamente 100 horas de cálculos computacionales, para que la solución convergiera. Lo que en total se traduce en 1000 horas de uso computacional para obtener los resultados.



a)



b)



c)

Figura 4.26 Distintos resultados para la velocidad nominal en la Boquilla., en a) se tiene la diferencia de presión entre la entrada y la salida del volumen de control Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

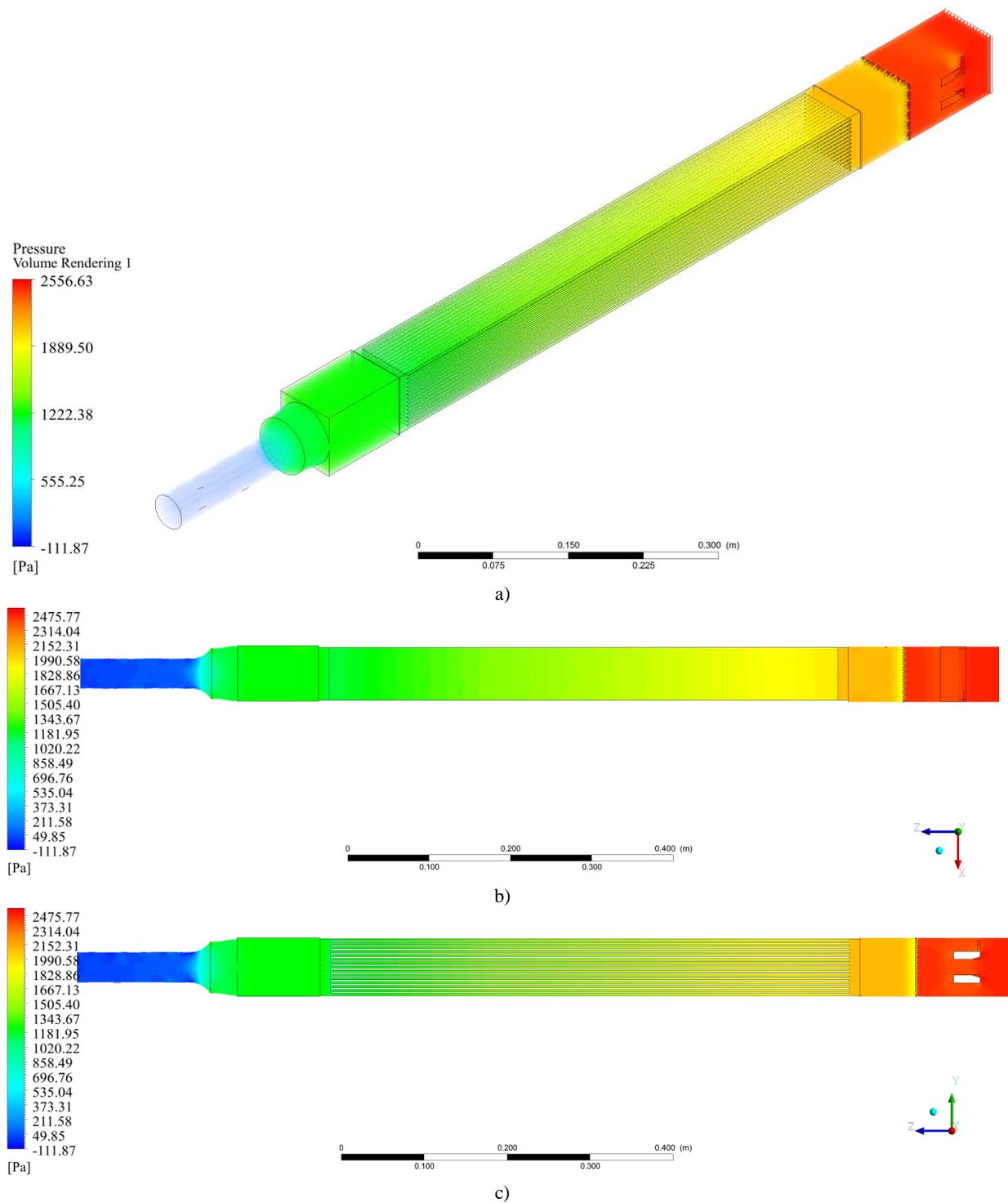


Figura 4.27 Distintos resultados globales para la velocidad nominal en el elemento combustible, se muestran los diagramas de contorno de la diferencia de presión entre la entrada y salida del elemento combustible. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

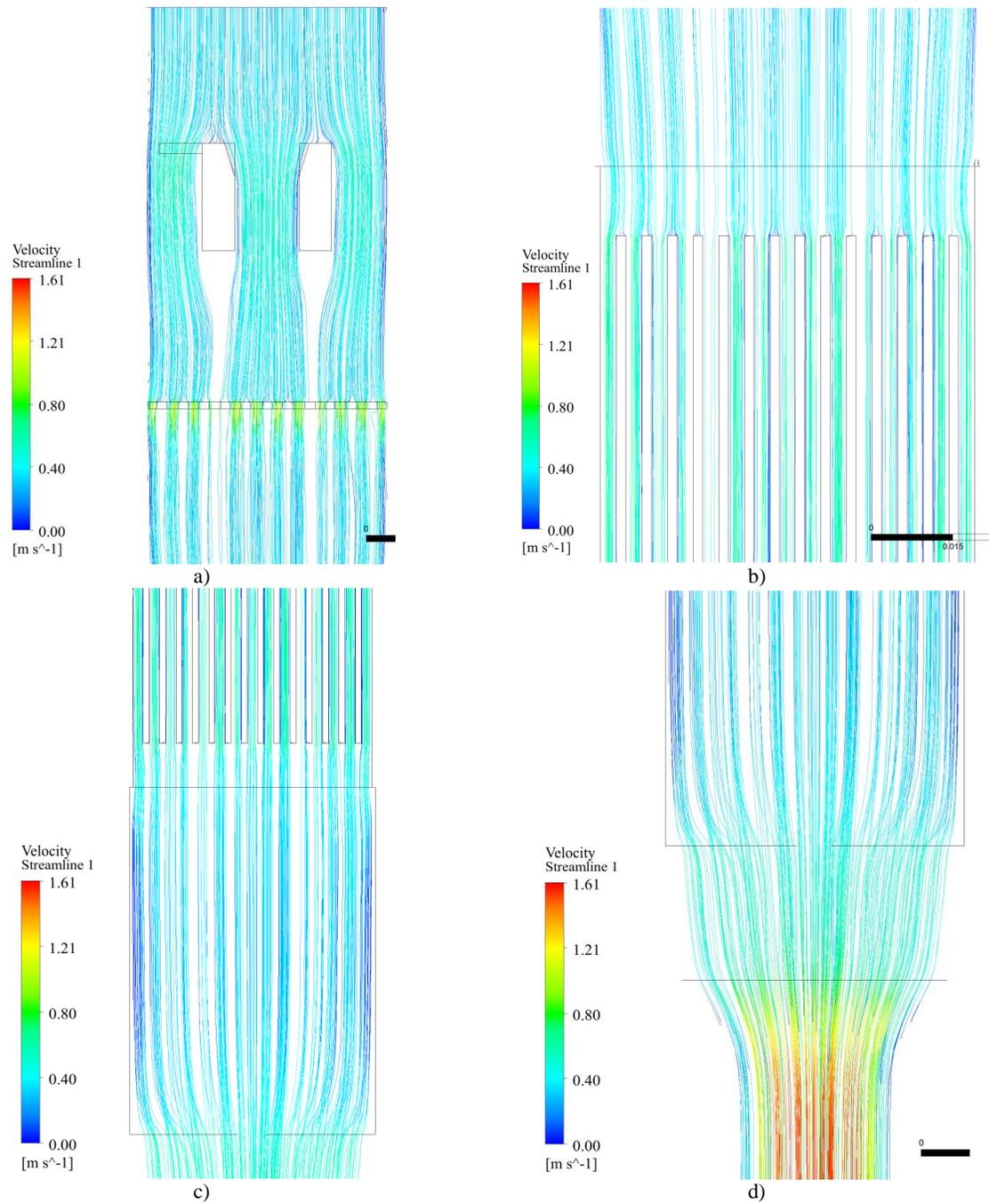


Figura 4.28 Líneas de corriente en las distintas secciones del elemento combustor para la velocidad nominal. Fuente: elaboración propia, generado en ANSYS.

4.13.5 Compendio de Resultados

Finalmente, se agrupan los resultados de las simulaciones y se muestran en la Tabla 4.6, donde agrega la columna *Suma*, que corresponde a la suma de pérdida de presión entre la Caja Filtro (*Filtro*), Cuerpo y Boquilla. También, se añade la columna *Error*, en la cual se calcula la diferencia entre la suma y los resultados del elemento combustible entero.

En la Tabla 4.7 se resumen los resultados obtenidos y los datos experimentales, se tienen los resultados computacionales en las columnas *Subconjunto* y *Entero*, junto a ellos se tienen los resultados *Analíticos* y, al final, se tienen las velocidades y presiones de los datos experimentales. Se destaca la velocidad nominal.

Como las velocidades elegidas difieren de la velocidades experimentales, se seleccionan las más similares para comparar y se crea la Tabla 4.8, cuya finalidad es mostrar la diferencia porcentual entre la caída de presión para cada velocidad.

Para establecer una comparación de datos más compacta, se tomaron los valores de la Tabla 4.7 y se genera el diagrama que está en la Figura 4.29, en cual se muestra la curva de pérdida de presión en función de la velocidad, para el método *Analítico Completo*, *Computacional Subconjunto* (suma de la Caja Filtro, Cuerpo y Boquilla), *Computacional Entero* y la curva que muestra los datos medidos, *Experimental*.

También, se genera el diagrama que se muestra en la Figura 4.30, en cual se expone la pérdida de presión para cada subconjunto, mediante el método analítico y computacional. Así, se puede ver de manera directa la diferencia entre ambos métodos.

Tabla 4.6 Resultados globales de las simulaciones Computacionales

| # | Fluido | | | Presión por separado | | | | Entero | Error |
|----|--------|-----------|---------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------|
| | V | \dot{m} | \dot{Q} | Filtro | Cuerpo | Boquilla | Suma | Elemento combustible | |
| | [m/s] | [kg/s] | [m ³ /s] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] | % |
| 1 | 0,01 | 0,058 | 0,000058 | 0,75 | 14,29 | 2,062 | 17,1 | 16,8 | 2% |
| 2 | 0,05 | 0,290 | 0,00029 | 10,4 | 82,8 | 33,62 | 126,8 | 124 | 2% |
| 3 | 0,1 | 0,580 | 0,00058 | 38,6 | 191,2 | 125,9 | 355,7 | 338 | 5% |
| 4 | 0,15 | 0,864 | 0,0008642 | 85,2 | 315,6 | 262,4 | 663,2 | 634 | 4% |
| 5 | 0,25 | 1,444 | 0,0014442 | 245 | 611,8 | 696,7 | 1553,5 | 1465 | 6% |
| 6 | 0,35 | 2,024 | 0,0020242 | 439,5 | 939,8 | 1317 | 2696,3 | 2556 | 5% |
| 7 | 0,55 | 3,184 | 0,0031842 | 1805 | 1390,7 | 3211 | 6406,7 | 5754 | 10% |
| 8 | 0,75 | 4,344 | 0,0043442 | 2536 | 2092,3 | 5666 | 10294,3 | 10106 | 2% |
| 9 | 0,95 | 5,504 | 0,0055042 | 3956 | 2905,7 | 8833 | 15694,7 | 15572 | 1% |
| 10 | 1,15 | 6,664 | 0,0066642 | 5118 | 3182,2 | 12780 | 21080,2 | 22188 | 5% |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.7 Resumen comparativo de los distintos resultados y antecedentes

| # | Fluido | | | Computacional | | Analítico | # | Experimental | |
|----|--------|-----------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----|--------------|-----------------|
| | V | \dot{m} | \dot{Q} | Subconjunto | Entero | Completo | | [m/s] | ΔP [Pa] |
| | [m/s] | [kg/s] | [m ³ /s] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] | ΔP [Pa] | | [m/s] | ΔP [Pa] |
| 1 | 0,01 | 0,058 | 0,000058 | 17 | 17 | 36 | 1 | 0,0035 | 1.150 |
| 2 | 0,05 | 0,290 | 0,00029 | 127 | 124 | 196 | 2 | 0,0207 | 1.500 |
| 3 | 0,1 | 0,580 | 0,00058 | 356 | 338 | 438 | 3 | 0,1183 | 2.050 |
| 4 | 0,15 | 0,864 | 0,0008642 | 663 | 634 | 723 | 4 | 0,2440 | 2.750 |
| 5 | 0,25 | 1,444 | 0,0014442 | 1.554 | 1.465 | 1.455 | 5 | 0,3930 | 4.750 |
| 6 | 0,35 | 2,024 | 0,0020242 | 2.696 | 2.556 | 2.373 | 6 | 0,5215 | 6.450 |
| 7 | 0,55 | 3,184 | 0,0031842 | 6.407 | 5.754 | 4.793 | 7 | 0,6574 | 8.750 |
| 8 | 0,75 | 4,344 | 0,0043442 | 10.294 | 10.106 | 8.084 | 8 | 0,7772 | 9.500 |
| 9 | 0,95 | 5,504 | 0,0055042 | 15.695 | 15.572 | 12.141 | 9 | 0,9058 | 10.050 |
| 10 | 1,15 | 6,664 | 0,0066642 | 21.080 | 22.188 | 17.036 | 10 | 1,0212 | 11.450 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.8 Comparaciones de velocidades computacionales y datos experimentales.

| Computacional | | | Experimental | | | Error |
|---------------|-------|-----------------|--------------|--------|-----------------|-------|
| # | [m/s] | ΔP [Pa] | # | [m/s] | ΔP [Pa] | |
| 1 | 0,01 | 16,8 | 1 | 0,0035 | 1150 | 99% |
| 3 | 0,1 | 338 | 3 | 0,1183 | 2050 | 84% |
| 5 | 0,249 | 1465 | 4 | 0,2440 | 2750 | 47% |
| 6 | 0,349 | 2556 | 5 | 0,3930 | 4750 | 46% |
| 7 | 0,549 | 5754 | 6 | 0,5215 | 6450 | 11% |
| 8 | 0,749 | 10106 | 8 | 0,7772 | 9500 | 6% |
| 9 | 0,949 | 15572 | 9 | 0,9058 | 10050 | 55% |

Fuente: elaboración propia.

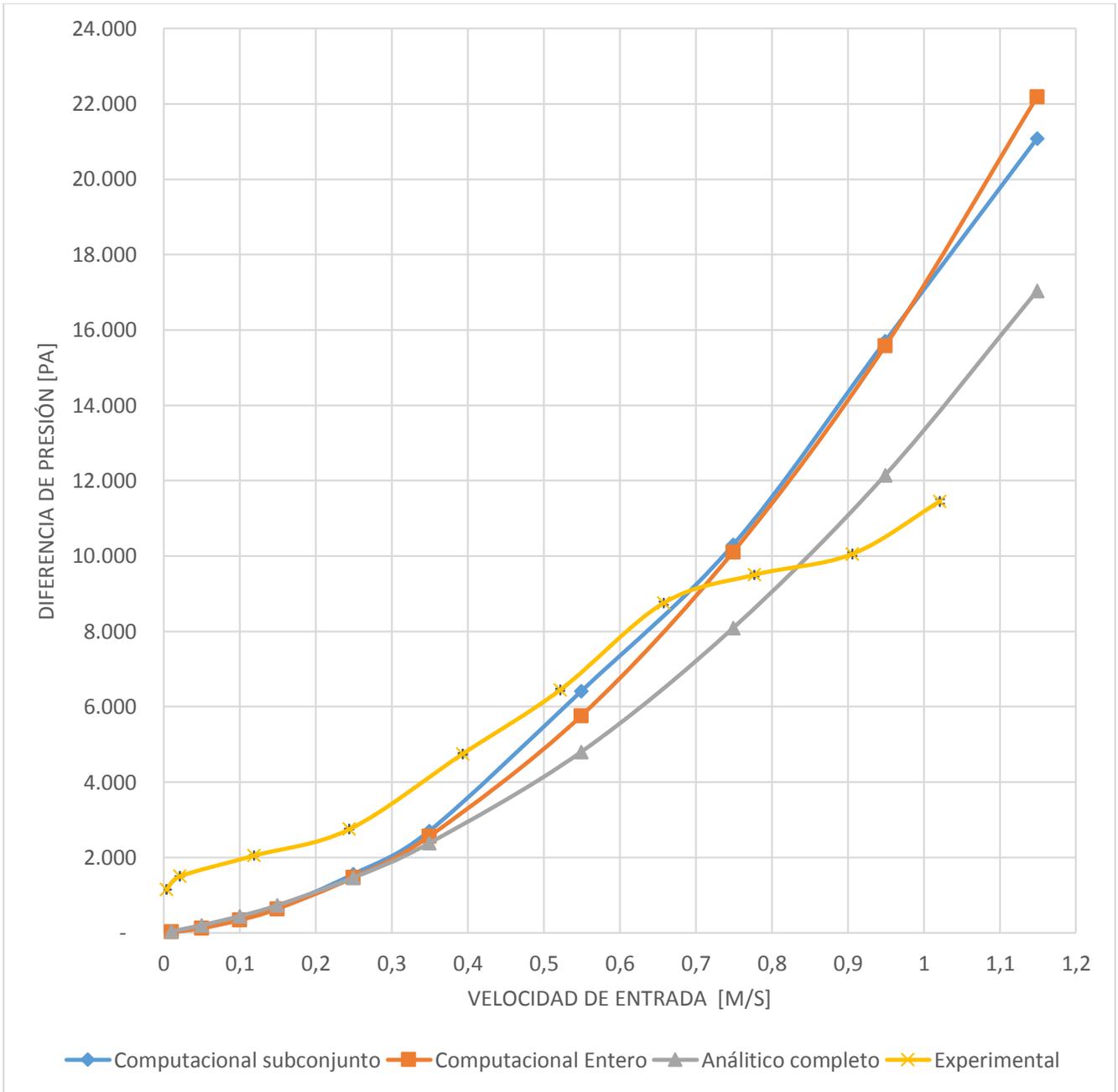


Figura 4.29 Diagrama de la curva de pérdida de presión en el elemento combustible para diferentes velocidades del refrigerante, mediante los distintos procedimientos. Fuente: elaboración propia.

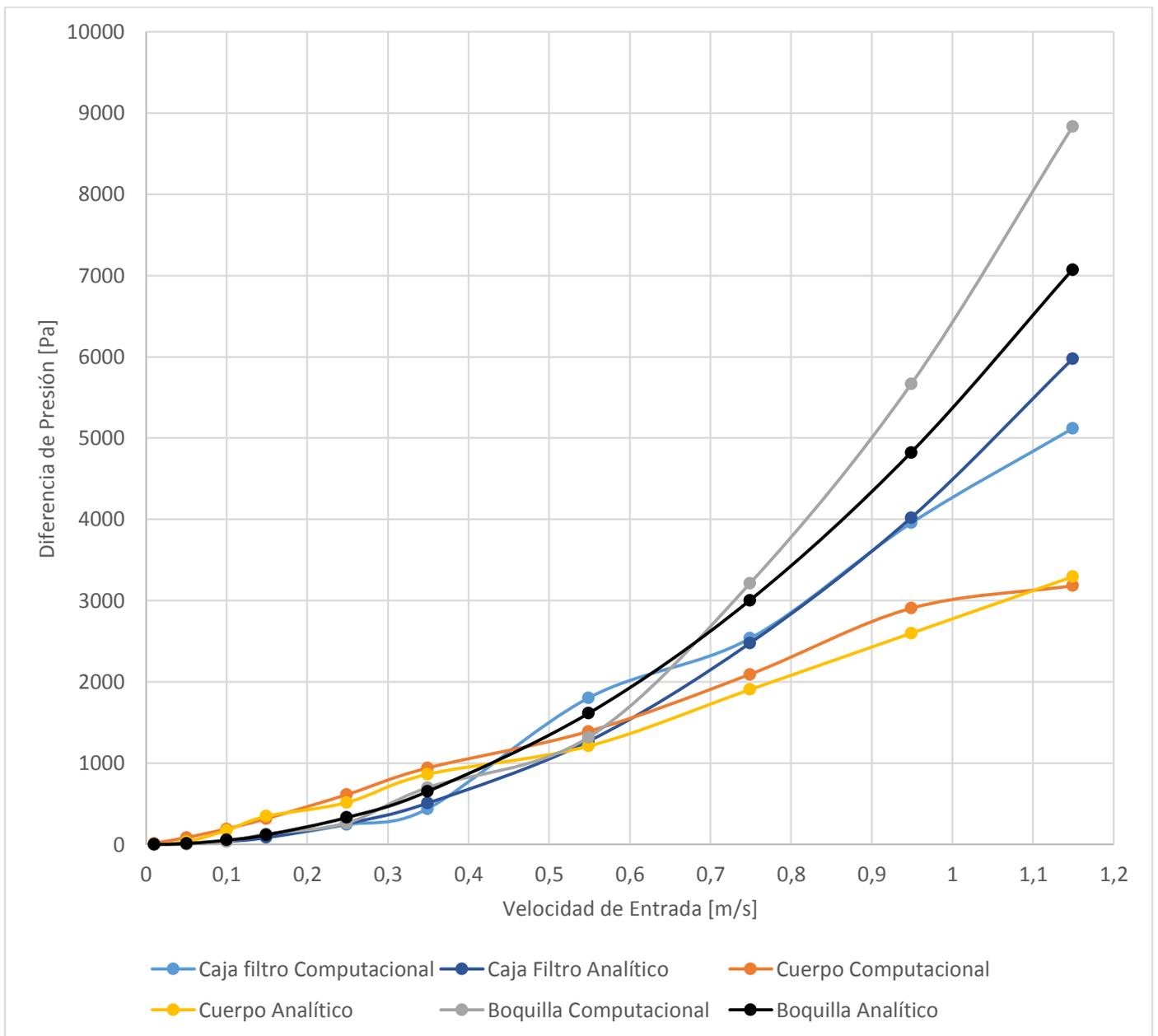


Figura 4.30 Diagrama del desglose de la pérdida de presión en cada subconjunto para las distintas velocidades, mediante los distintos procedimientos. Fuente: elaboración propia.

5 Discusión, Análisis y Comparación de Resultados

A partir de los resultados que se obtuvieron y que se compilan en capítulo anterior, se realizan las interpretaciones, extrapolaciones y comparaciones presentes.

El primer resultado que se analiza, corresponde al cálculo analítico, para el cual se utilizaron los modelos teóricos y experimentales planteados en la literatura del área, expuesta en la sección de antecedentes de Mecánica de Fluidos (3.5). Las ecuaciones que se utilizaron, consideran la existencia de un régimen laminar desarrollado, el cual es impuesto a partir de la condición normal de operación del reactor. De los resultados que se obtuvieron, ver Tabla 4.4, se desprende que la pérdida de presión va de 36 [Pa] a 17.036 [Pa], valores que se encuentran en torno al valor de caída de presión en el núcleo nominal (Tabla 3.1) que corresponde a 14.709 [Pa]. A raíz de este dato, se establecen como un parámetro de aproximación inicial las expresiones que se utilizaron para realizar el cálculo analítico, puesto que se encuentra en el mismo orden de magnitud. También se puede comparar con el estudio realizado en CFX (ver sección 3.3.1), cuya caída de presión computacional corresponde a 19.583 [Pa] (ver Tabla 3.2) y que tiene una diferencial del 13% con respecto a la velocidad 1,15 [m/s].

Una vez que se realizan las primeras simulaciones computacionales, se busca una simplificación de la geometría, la cual se aborda mediante la estrategia de la simetría geométrica, utilizada en el estudio del reactor canadiense (sección 3.4). Se realiza la simetría en la Boquilla, cuya geometría permite generar reflexiones en dos planos (medio y un cuarto del volumen). Se analizó el caso para la velocidad nominal donde los resultados arrojaron que existe un 27% y 26% de diferencia entre las simplificaciones y el subconjunto completo. Por lo que se descarta la simetría, esto podría refutar el estudio realizado por Taesung [8].

Para la resolución de problemas mediante CFD, las características del computador que se utilicen y la licencia del programa son fundamentales. Por ejemplo, la memoria RAM es la encargada de llevar a cabo el proceso de mallado y su soporte, por lo que los 16 GB limitaron a utilizar elementos tetraédricos, sin poder incorporar los hexaedros a las paredes, estos representan de mejor manera el fenómeno de capa límite. El procesador y sus núcleos son los encargados de llevar a cabo el cálculo de las ecuaciones que resuelven el problema, a pesar de poseer 8 núcleos, la licencia de ANSYS académico solo autorizaba el funcionamiento de 4. Por lo que con un computador con mayores capacidades se mejoraría la malla y se reduciría el tiempo de simulación, el cual asciende a 1.290 horas.

Se divide el elemento combustible en tres subconjuntos, con el objetivo de asegurar la convergencia de la malla a generar. Se utilizan diversos métodos de mallado en cada uno de ellos, siendo los mejores para simular el comportamiento del fluido, los métodos utilizados en la Boquilla. Sin embargo, la alta complejidad geométrica no permitió replicar los métodos en los otros subconjuntos ni en el elemento combustible completo. De los tres subconjuntos, el que posee mayor cantidad de elementos es el Cuerpo, esto se debe a su mayor envergadura. Y la Caja Filtro, es el subconjunto que posee la mayor dificultad de mallado, debido a las distintas piezas que la componen. Finalmente, cuando se crea el mallado del elemento completo, se utiliza una malla no estructurada compuesta por tetraedros, la que alcanza la suma de 10 millones de elementos. Los cuatros volúmenes mallados fueron validados con el método Skewness, con el que se cataloga como muy buenas a excelentes las mallas y con el método Aspect Ratio, estando muy por abajo del límite.

Con las distintas figuras que se exponen en el capítulo de resultados, como lo son diagramas de contorno de presión y líneas de corrientes, se determina el aporte de cada subconjunto en la pérdida de presión total, al ver la Figura 4.30, es claro que la Boquilla ocurre la mayor caída, luego viene la Caja Filtro y , finalmente, el Cuerpo. De manera más detallada se analiza la influencia de cada pieza en la caída de presión, ver de la Figura 4.23 a la Figura 4.28. Las piezas que más influyen son: la placa filtro, la boquilla, la pieza de orientación y los travesaños.

Los resultados obtenidos de las simulaciones computacionales en el elemento combustible se pueden comparar con los resultados de las simulaciones de los subconjuntos, ver Tabla 4.6. En dicha tabla se muestra que el mayor error corresponde a 10%. Además, en la Figura 4.29 se aprecia como las curvas de la *Computacional Subconjunto* y *Computacional Entero*, siguen la misma tendencia y solo difieren en pequeñas cantidades. Por ende, se toma como válido simular cada subconjunto, y luego sumar las pérdidas de presión.

Los resultados obtenidos de las simulaciones computacionales en el elemento combustible se pueden comparar con los resultados de los cálculos analíticos, en donde se compara con respecto a la columna *Completo* de cálculos analíticos expuestos en la Tabla 4.6 y junto con la Figura 4.29, se aprecia que ambos métodos siguen la misma tendencia. Sin embargo, la curva *Analítica Completo* (gris) está por debajo del método computacional; a medida que la velocidad aumenta, la diferencia porcentual disminuye, esto ocurre hasta $0,25[m/s]$, donde la diferencia es 1%; para la velocidad nominal corresponde a 8%; luego, a medida que la velocidad aumenta, la diferencia llega a ser 30%. Por lo que el método analítico sirve de referencia para un rango de velocidad pequeño.

Finalmente, los resultados obtenidos de las simulaciones computacionales en el elemento combustible se pueden comparar con los datos experimentales que fueron proporcionados por la CCHEN. En la Tabla 4.7 se aprecia las que las velocidades de entrada del fluido difieren, incluso la velocidad 10 ($1,02[m/s]$) es menor se su símil computacional. Por lo que, para poder comparar los datos, se toman 7 velocidades similares, ver Tabla 4.8, de la cual se desprende que la diferencia porcentual para velocidades pequeñas es excesivamente grande , hasta un 99%. A medida que la velocidad aumenta la diferencia disminuye, reduciéndose hasta 6%. Al apreciar la Figura 4.29, se puede ver que las curvas siguen una tendencia de aumento similar, pero al pasar la velocidad $0,65[m/s]$ la curva *Experimental* sufre un estancamiento. Esto se puede atribuir a una alteración de la instrumentación utilizada en la bancada de prueba, existiendo una saturación del medidor de presión digital

6 Conclusiones

Una vez finalizado el estudio, se concluye que la motivación planteada, que busca aumentar la seguridad del área nuclear, sirvió de guía para concretar el trabajo con éxito. La misma importancia se entrega a la definición clara de los objetivos a cumplir y a los alcances razonables que acotan la memoria. La metodología que se formuló en un comienzo, se siguió de manera estricta en el desarrollo de la memoria, es decir, desde la definición del problema hasta la validación de los datos.

Se realizó un estudio bibliográfico enfocado en la resolución del problema, de este se extrae la información relevante sobre el funcionamiento del RECH-1 y la velocidad nominal de trabajo ($0,349[m/s]$), se describe detalladamente el elemento combustible, se exponen los datos que servirán para la validación de los resultados, se explican las ecuaciones necesarias para el cálculo analítico y se exponen los métodos para validar el mallado.

Se aborda de manera técnica el cálculo analítico, basado en formulas extraídas de la bibliografía del área de Mecánica de Fluidos, con lo que se obtuvieron resultados satisfactorios para este método. Para lo anterior, se exigió que la caída de presión estuviese dentro del rango de magnitud expuesto en los antecedentes y posteriormente comparado con los resultados computacionales. Es decir, sirven como primera aproximación a la resolución del problema.

La geometría que se generó, se cataloga de alta complejidad. Esta se desarrolló en el programa Inventor, el cual facilita la creación de un modelo 3D del elemento combustible. Se hizo necesario diseñar el elemento combustible y sus subconjuntos (Caja Filtro, Cuerpo y Boquilla), para luego generar los negativos, los cuales representan al fluido que circula por el interior. Se destaca que no se realizó ninguna simplificación del elemento combustible y se trabajó con los planos suministrados por la CCHEN.

La estrategia de trabajar con subconjuntos, se enfoca en el mejor manejo del mallado; considerando la complejidad que cada uno de éstos presenta. Se generó el mejor mallado de acuerdo a las limitaciones computacionales, a pesar de ello, se obtuvo que la calidad de malla es satisfactoria para resolver un problema de fluidodinámica. Se utilizaron los métodos Skewness y Aspect Ratio para calificar la malla. El elemento combustible presenta aproximadamente 10,6 millones de elementos y la suma de los subconjuntos presenta 9,3 millones de elementos.

Se descarta la posibilidad de simplificar la geometría de trabajo utilizando planos de simetría, los resultados que obtuvieron para este caso, evidencian que el fluido se ve afectado por los planos de simetría. La diferencia de caída de presión para los casos de la mitad y un cuarto de la Boquilla, ascienden a 27% y 26% respectivamente. Se concluye que no se puede aprovechar la simetría de la geometría de interés.

De las simulaciones que se realizaron, se obtienen resultados para la Caja Filtro, Cuerpo y Boquilla por separado, como también para el elemento combustible. De estos se obtiene que la pérdida de presión calculada en base a la suma de los subconjuntos difiere en 5% del elemento combustible, para la velocidad nominal. Por lo que se concluye que es válido realizar las simulaciones por separado.

Con los datos aportados por la CCHEN se pudo comparar el modelo computacional con respecto a mediciones experimentales. De lo cual, se puede concluir que el modelo computacional presenta cercanía numérica para un rango acotado de las velocidades estudiadas, no se puede realizar una comparación absoluta, puesto que los datos experimentales presentan alteraciones que no son

explicables físicamente. De manera global, se toman como exitosos los resultados computacionales y se reconoce el valor de estos, para lograr la caracterización hidráulica del elemento y así completar el objetivo general de la memoria.

Desde el punto de vista del fluido, sin considerar el lado constructivo, operativo y funcional, se sugiere:

1. Retirar la placa filtro, de no ser posible, se puede tomar como alternativa la homogeneización de las perforaciones, junto con suavizar los bordes a la entrada y salida de éstas.
2. Modificar la pieza de orientación con un diseño que cumpla la misma función, pero que no genere área de frenado al fluido.
3. Cambiar la geometría de los travesaños, se sugiere geometrías más amigables con el fluido, como lo son los cilindros, prismas romboidales o perfiles alares.
4. Suavizar la transición entre el Cuerpo y la Boquilla, evitando cambios de geometrías abruptos.

Para la continuación y expansión de la presente memoria, se plantea realizar un análisis termohidráulico con variación de velocidad en el elemento combustible. Posteriormente, se puede seguir avanzando en la simulación del núcleo completo.

Bibliografía

- [1] IAEA, «Good Practice for Qualification of High Density Low Enriched Uranium Research Reactor Fuel,» INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 2009.
- [2] J. Daie, J. Medel, H. Torres, D. Calderón, L. Iturrieta y M. Loncomilla, «Descripción del Reactor RECH-1,» CCHEN, Santiago, 2004.
- [3] E. Britannica, «www.britannica.com,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor/images-videos/A-water-cooled-research-reactor-with-graphite-blocks-serving-as/160853>. [Último acceso: 15 Noviembre 2016].
- [4] W. M. Torres, P. E. Umbehaun, D. A. Andrade y J. A. Souza, «A MTR Fuel Element Flow Distribution Measurement Preliminary Results,» Universidad de Sao Paulo- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Sao Paulo.
- [5] J. Angelo, «Análisis y Modelamiento Termohidráulico del Elemento Combustible del Reactor Experimental Nuclear RECH-1 de la Comisión Chilena de Energía Nuclear Sede La Reina,» Universidad de Magallanes - CCHEN, Punta Arenas, Chile, 2011.
- [6] D. Muñoz, «Diseño de un Loop Hidráulico Para Caracterización de Elementos Combustibles Nucleares RECH-1,» Universidad de Chile, Santiago, 2016.
- [7] C. Gutierrez, «Informe Avance Meta CDC/2016-DMN, Medición de pérdidas de carga hidráulicas elemento combustible RECH-1,» CCHEN, Santiago, 2016.
- [8] H. Taesung , «Hydraulic Studies of the 18-Plate Assembly in the McMaster Nuclear Reactor,» McMaster University, Hamilton, Ontario, 2002.
- [9] R. Mott, Mecánica de Fluidos, México : Pearson Educación, 2006.
- [10] M. C. Potter, Mecánica de Fluidos, Pacific Grove: Thompson learning, 2002.
- [11] Y. Bayazit, «Fluid mechanic phenomena relating to flow control in conduits and pumps,» University of Minnesota, Minnesota, 2014.
- [12] M. C. M. A. M. L.J. Weber, «Headloss Characteristics For Perforated Plates And Flat Bar Screen,» Iowa Institute of Hydrualic Engineering, Iowa City, 2000.

- [13] D. S. Miller, *Internal Flow Systems*, Cranfield, Bedford, UK: BHRA (INFORMATION SERVICES), 1978.
- [14] I. Shame, *Mecánica de Fluidos*, Bogota, Colombia: McGraw-Hill, 1995.
- [15] A. Valencia y R. Paredes, «Laminar flow and heat transfer in confined channel flow past square bars arranged side by side,» *Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 721-728, 2003.
- [16] Miller, «Critical velocities for collapse of reactor parallel plate fuel assemblies,» KAPL, S.I, 1954.
- [17] M. Versteeg, *An Introduction to Computation Fluid Dynamics: THE FINITE VOLUME METHOD*, Edinburgh Gate, Harlow, England: Person Education, 2007.
- [18] Ansys Inc, *ANSYS FLUENT User's Guide*, Pennsylvania: Ansys inc, 2011.
- [19] A. inc, *ANSYS Meshing -Application Introduction,*, Canonsburg, PA: ANSYS,Inc., 2009.
- [20] C. C. Liu y Y. M. Ferng, «Numerically simulating the Thermal-hydraulic characteristics within the fuel rod bundle using CFD methodology,» *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, pp. 3078-3086, 2010.
- [21] G. Samuel, *Ingeniería de Reactores Nucleares*, Barcelona: Reverté, 1968.
- [22] B. R. T. frost, *Nuclear Fuel Elements*, Illinois, USA: Pergamon Press, 1982.
- [23] H. Contreras, L. Olivares, J. Lisboa, J. Marin y C. Gutiérrez, «Factibilidad Técnico-Económica de Fabricación y Exportación de Elementos Combustibles,» CCHEN, Santiago, 2012.
- [24] IAEA, «nucleus.iaea.org,» 31 mayo 2016. [En línea]. Available: <https://nucleus.iaea.org/RRDB/Reports/Container.aspx?Id=A1>. [Último acceso: 31 mayo 2016].
- [25] IAEA, «nucleus.iaea.org,» 31 mayo 2016. [En línea]. Available: <https://nucleus.iaea.org/RRDB/Reports/Container.aspx?Id=B1>. [Último acceso: 31 mayo 2016].
- [26] P. E. Umbehaun, «Metodología para análisis termo-hidráulica de reactores de pesquisa tipo piscina com combustível tipo placa,» Ipen-Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 2000.

- [27] V. Martínez, D. Milovic y C. Sepúlveda, «Análisis Termo-Hidráulico del Reactor,» Departamento de Seguridad Nuclear y Radiológica (DSNR), CCHEN, Santiago, 2012.
- [28] N. Todreas and M. Kazimi, Nuclear Systems I, Thermal Hydraulic Fundamentals, New York, NY: Taylor & Francis, 1990.
- [29] Y. Bae, Y. In Kim y C. Tae Park, «CFD analysis of flow distribution at the core inlet of SMART,» *Nuclear Engineering and Design*, vol. 258, pp. 19-25, 2013.
- [30] P. Ferziger, Computational Methods for Fluid Dynamics, Verlag Berlin Heidelberg New York: Springer, 2002.