

Universidad de los Andes  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Centro de Investigaciones en Acueductos y  
Alcantarillados  
**CIACUA**



Modelación numérica del flujo supercrítico en cámaras de  
inspección para sistemas de alcantarillado.

Proyecto de grado  
Ingeniería Civil

Santiago Arango de Larrañaga

Bogotá, Julio 2012



---

## RESUMEN

Esta investigación busca estudiar los mecanismos numéricos disponibles para resolver el flujo supercrítico que se presenta en las cámaras de inspección de los sistemas de alcantarillado. Debido a la complejidad del flujo y su entorno es necesario incluir el fenómeno de la turbulencia en los modelos matemáticos. De manera que se hace uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y de tres modelos de turbulencia para simular escenarios de flujo que han sido previamente modelados experimentalmente. Los resultados obtenidos demuestran que el uso de la CFD puede ser muy útil para los procesos de estudio y diseño de cámaras de inspección en sistemas de alcantarillado, aunque quedan aspectos por mejorar en cuanto a los procesos de experimentación y de análisis numérico de estos componentes hidráulicos.



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos .....	2
1.1.1. Objetivo general.....	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>3</b>
2.1. Dinámica de fluidos computacional.....	3
2.2. Ecuaciones que gobiernan el flujo .....	4
2.2.1. Ecuación de conservación de la masa .....	4
2.2.2. Ecuación de conservación de momentum .....	4
2.2.3. Ecuación de conservación de la energía .....	5
2.3. Flujo multifásico .....	5
2.4. El fenómeno de la turbulencia .....	6
2.4.1. Consideraciones matemáticas sobre el fenómeno de la turbulencia.....	6
2.4.2. Modelación del fenómeno turbulento.....	9
2.5. Investigación de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico.....	12
2.5.1. Modelo hidráulico .....	12
2.5.2. Instrumentación del modelo y procedimiento de medición .....	15
2.5.3. Pruebas sobre el modelo hidráulico.....	17
2.6. Clasificación de flujos en canales abiertos:.....	19
<b>3. SIMULACIÓN Y MODELO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>20</b>
3.1. Diseño a computador del modelo hidráulico:.....	20
3.2. Enmallado de la geometría .....	22
3.3. Selección de escenarios de modelación.....	24
3.4. Definición de las condiciones de frontera.....	27
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>30</b>
4.1. Escenarios de modelación para Unión de flujos (UF) .....	30
4.2. Escenarios de modelación para Flujo Directo (FD) y Flujo a 90° (FN) .....	36
4.3. Comportamiento de los residuos de las ecuaciones fundamentales .....	41



---

<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
5.1. Perfiles de flujo .....	45
5.2. Fenómeno de recirculación.....	48
5.3. Tiempos de simulación.....	55
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>58</b>
7.1. Escenario de modelación UF-2.....	58
7.2. Escenario de modelación UF-3.....	62
7.3. Escenario de modelación UF-4.....	67
7.4. Escenario de modelación UF-5.....	72
7.5. Escenario de modelación FD-3.....	77
7.6. Escenario de modelación FD-4.....	80
7.7. Escenario de modelación FD-6.....	84
7.8. Escenario de modelación FD-8.....	88
7.9. Escenario de modelación FN-7.....	91
7.10. Escenario de modelación FN-8.....	94
<b>8. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>99</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tuberías de entrada y salida a la cámara de inspección. ....	25
Tabla 2: Pruebas a simular, escenario Unión de flujos (UN). ....	25
Tabla 3: Pruebas a simular, escenario Flujo Directo (FD).....	26
Tabla 4: Pruebas a simular, escenario Flujo a 90° (FN).. ....	26
Tabla 5: Variables de entrada y variables de salida para los modelos conceptuales. ....	27
Tabla 6: Parámetros temporales de simulación.....	30
Tabla 7: Tiempos de simulación para cada escenario.....	30
Tabla 8: Condiciones de flujo para UF-2. ....	31
Tabla 9: Condiciones de flujo para UF-3 .....	31
Tabla 10: Condiciones de flujo para UF-4. ....	32
Tabla 11: Condiciones de flujo para UF-5. ....	32
Tabla 12: Condiciones de flujo para FD-3.....	37
Tabla 13: Condiciones de flujo para FD-4.....	37
Tabla 14: Condiciones de flujo para FD-6.....	37
Tabla 15: Condiciones de flujo para FD-8.....	37
Tabla 16: Condiciones de flujo para FN-7. ....	37
Tabla 17: Condiciones de flujo para FN-8. ....	37



---

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Perfil recto de flujo por la línea central para UF-2. ....	33
Gráfica 2: Perfil recto de flujo por la línea derecha para UF-2.....	34
Gráfica 3: Perfil recto de flujo por la línea de flujo izquierda para UF-2.....	34
Gráfica 4: Perfil curvo de flujo por la línea central para UF-2.....	35
Gráfica 5: Perfil curvo de flujo por la línea derecha para UF-2. ....	35
Gráfica 6: Perfil curvo de flujo por la línea izquierda para UF-2. ....	36
Gráfica 7: Perfil recto de flujo por la línea central para FD-4. ....	39
Gráfica 8: Perfil recto de flujo por línea derecha para FD-4 .....	39
Gráfica 9: Perfil recto de flujo por línea izquierda para FD-4.....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Variaciones en la velocidad. ....	7
Figura 2: Montaje experimental de la cámara de inspección. ....	13
Figura 3: Forma de la cañuela. ....	13
Figura 4: Configuraciones de caídas. ....	14
Figura 5: Estructura de medición. ....	16
Figura 6: Estructura de medición al interior de la cámara. ....	16
Figura 7: Resultados para escenario UF-6 (Dinámica del flujo). ....	18
Figura 8: Modelo computacional de la cámara de inspección. ....	21
Figura 9: Vista lateral de tubería de entrada principal y tubería de salida. ....	22
Figura 10: Vista lateral de tubería de entrada lateral. ....	22
Figura 11: Cañuela del modelo computacional. ....	22
Figura 12: Superficie del enmallado de la cámara de inspección. ....	23
Figura 13: Elementos internos del enmallado. ....	23
Figura 14: Inflación al interior del dominio. ....	24
Figura 15: Inflación en tubería de entrada principal. ....	24
Figura 16: Relaciones geométricas para tubería parcialmente llena. ....	26
Figura 17: Perfiles recto y curvo de flujo en UF-2. ....	28
Figura 18: Plano de corte para perfil recto de flujo por línea central. ....	31
Figura 19: Planos de corte para perfil curvo de flujo por línea central. ....	31
Figura 20: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	32
Figura 21: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	32
Figura 22: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k- $\omega$ . ....	33
Figura 23: Superficie del flujo en FD-4. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	38
Figura 24: Superficie del flujo en UFD-4. Modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	38
Figura 25: Superficie del flujo en FD-4. Modelo k- $\omega$ . ....	38
Figura 26: Residuos para FN-8, modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	42



---

Figura 27: Residuos para FN-8, modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	42
Figura 28: Residuos para FN-8, modelo k- $\omega$ .....	42
Figura 29: Residuos para FD-4, modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	43
Figura 30: Residuos para FD-4, modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	43
Figura 31: Residuos para FD-4, modelo k- $\omega$ .....	43
Figura 32: Residuos para FD-6, modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	44
Figura 33: Residuos para FD-6, modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	44
Figura 34: Residuos para FD-6, modelo k- $\omega$ .....	44
Figura 35: Formación de onda C en UF-2. Modelo k- $\omega$ de turbulencia. ....	47
Figura 36: Zonas de formación de ondas estacionarias. ....	48
Figura 37: Vórtices i recirculación en escenario FN-7. ....	49
Figura 38: Vórtices o recirculación en escenario FN-8.....	49
Figura 39: Vórtices o recirculación en escenario FD-3.....	50
Figura 40: Vórtices o recirculación en escenario FD-4.....	51
Figura 41: Vórtices o recirculación en escenario FD-6.....	51
Figura 42: Vórtices o recirculación en escenario FD-8.....	52
Figura 43: Vórtices o recirculación en escenario UF-2.....	53
Figura 44: Vórtices o recirculación en escenario UF-3.....	53
Figura 45: Vórtices o recirculación en escenario UF-4.....	54



---

## ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1: Formación de una Onda C en el punto de confluencia de los flujos, para el escenario UF-2  
..... 47

## ÍNDICE DE GRÁFICAS EN ANEXOS

Gráfica anexa 1: Perfil recto de flujo por línea central para UF-2.....	60
Gráfica anexa 2: Perfil recto de flujo por línea derecha para UF-2.....	60
Gráfica anexa 3: Perfil recto de flujo por línea izquierda para UF-2.....	61
Gráfica anexa 4: Perfil curvo de flujo por la línea central para UF-2. ....	61
Gráfica anexa 5: Perfil curvo de flujo por línea derecha para UF-2. ....	62
Gráfica anexa 6: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para UF-2. ....	62
Gráfica anexa 7: Perfil recto de flujo por línea central para UF-3.....	65
Gráfica anexa 8: Perfil recto de flujo por línea derecha para UF-3.....	65
Gráfica anexa 9: Perfil recto de flujo por línea izquierda para UF-3.....	66
Gráfica anexa 10: Perfil curvo de flujo por la línea central para UF-3. ....	66
Gráfica anexa 11: Perfil curvo de flujo por línea derecha para UF-3. ....	67
Gráfica anexa 12: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para UF-3. ....	67
Gráfica anexa 13: Perfil recto de flujo por línea central para UF-4.....	70
Gráfica anexa 14: Perfil recto de flujo por línea derecha para UF-4.....	70
Gráfica anexa 15: Perfil recto de flujo por línea izquierda para UF-4.....	71
Gráfica anexa 16: Perfil curvo de flujo por línea central para UF-4.....	71
Gráfica anexa 17: Perfil curvo de flujo por línea derecha para UF-4. ....	72
Gráfica anexa 18: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para UF-4. ....	72
Gráfica anexa 19: Perfil recto de flujo por línea central para UF-5.....	75
Gráfica anexa 20: Perfil recto de flujo por línea derecha para UF-5.....	75
Gráfica anexa 21: Perfil recto de flujo por línea izquierda para UF-5.....	76
Gráfica anexa 22: Perfil curvo de flujo por línea central para UF-5.....	76
Gráfica anexa 23: Perfil curvo de flujo por línea derecha para UF-5. ....	77
Gráfica anexa 24: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para UF-5. ....	77
Gráfica anexa 25: Perfil recto de flujo por la línea central para FD-3.....	80
Gráfica anexa 26: Perfil recto de flujo por línea izquierda para FD-3.....	80



---

Gráfica anexa 27: Perfil recto de flujo por línea central para FD-4.....	83
Gráfica anexa 28: Perfil recto de flujo por línea derecha para FD-4.....	83
Gráfica anexa 29: Perfil recto de flujo por línea izquierda para FD-4.....	84
Gráfica anexa 30: Perfil recto de flujo por línea central para FD-6.....	86
Gráfica anexa 31: Perfil recto de flujo por línea derecha para FD-6.....	87
Gráfica anexa 32: Perfil recto de flujo por línea izquierda para FD-6.....	87
Gráfica anexa 33: Perfil recto de flujo por línea central para FD-8.....	90
Gráfica anexa 34: Perfil recto de flujo por línea derecha para FD-8.....	90
Gráfica anexa 35: Perfil recto de flujo por línea izquierda para FD-8.....	91
Gráfica anexa 36: Perfil curvo de flujo por línea central para FN-7.....	93
Gráfica anexa 37: Perfil curvo de flujo por línea derecha para FN-7.....	94
Gráfica anexa 38: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para FN-7.....	94
Gráfica anexa 39: Perfil curvo de flujo por línea central para FN-8.....	97
Gráfica anexa 40: Perfil curvo de flujo por línea derecha para FN-8.....	97
Gráfica anexa 41: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para FN-8.....	98

## ÍNDICE DE FIGURAS EN ANEXOS

Figura anexa 1: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	58
Figura anexa 2: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	58
Figura anexa 3: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k- $\omega$ . ....	59
Figura anexa 4: Patrón de flujo tridimensional para UF-2. ....	59
Figura anexa 5: Superficie del flujo en UF-3. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	63
Figura anexa 6: Superficie del flujo en UF-3. Modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	63
Figura anexa 7: Superficie del flujo en UF-3. Modelo k- $\omega$ ....	64
Figura anexa 8: Patrón de flujo tridimensional para UF-3. ....	64
Figura anexa 9: Superficie del flujo en UF-4. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	68
Figura anexa 10: Superficie del flujo en UF-4. Modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	68
Figura anexa 11: Superficie del flujo en UF-4. Modelo k- $\omega$ ....	69
Figura anexa 12: Formación de un resalto en la tubería principal.....	69
Figura anexa 13: Superficie del flujo en UF-5. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	73
Figura anexa 14: Superficie del flujo en UF-5. Modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	73
Figura anexa 15: Superficie del flujo en UF-5. Modelo k- $\omega$ . ....	74
Figura anexa 16: Formación de un resalto en la tubería principal.....	74
Figura anexa 17: Superficie del flujo en FD-3. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	78
Figura anexa 18: Superficie del flujo en FD-3. Modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	78
Figura anexa 19: Superficie del flujo en FD-3. Modelo k- $\omega$ . ....	79
Figura anexa 20: Patrón de flujo tridimensional para FD-3. ....	79
Figura anexa 21: Superficie del flujo en FD-4. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	81
Figura anexa 22: Superficie del flujo en FD-4. Modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	81
Figura anexa 23: Superficie del flujo en FD-4. Modelo k- $\omega$ . ....	82
Figura anexa 24: Patrón de flujo tridimensional para FD-4. ....	82
Figura anexa 25: Superficie del flujo en FD-6. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	84
Figura anexa 26: Superficie del flujo en FD-6. Modelo k- $\epsilon$ RNG ....	85



---

Figura anexa 27: Superficie del flujo en FD-6. Modelo k- $\omega$ . .....	85
Figura anexa 28: Patrón de flujo tridimensional para FD-6. ....	86
Figura anexa 29: Superficie del flujo en FD-8. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	88
Figura anexa 30: Superficie del flujo en FD-8. Modelo k- $\epsilon$ RNG .....	88
Figura anexa 31: Superficie del flujo en FD-8. Modelo k- $\omega$ . ....	89
Figura anexa 32: Patrón de flujo tridimensional para FD-8. ....	89
Figura anexa 33: Superficie del flujo en FN-7. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	91
Figura anexa 34: Superficie del flujo en FN-7. Modelo k- $\epsilon$ RNG .....	92
Figura anexa 35: Superficie del flujo en FN-7. Modelo k- $\omega$ .....	92
Figura anexa 36: Patrón de flujo tridimensional. ....	93
Figura anexa 37: Superficie del flujo en FN-8. Modelo k- $\epsilon$ estándar. ....	95
Figura anexa 38: Superficie del flujo en FN-8. Modelo k- $\epsilon$ RNG. ....	95
Figura anexa 39: Superficie del flujo en FN-8. Modelo k- $\omega$ . ....	96
Figura anexa 40: Patrón de flujo tridimensional. ....	96

## 1. INTRODUCCIÓN

Las cámaras de inspección son estructuras hidráulicas utilizadas para unir, ventilar, inspeccionar y darle mantenimiento a las tuberías de un sistema de alcantarillado (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010), por lo que estudiar y modelar el comportamiento hidráulico en este tipo de elementos es fundamental para asegurar un diseño de sistemas de alcantarillado eficientes y de bajo costo, evitando problemas de desbordamiento y afloramiento del agua a la superficie.

El flujo de entrada a una cámara de inspección puede ser subcrítico o supercrítico. Cuando el régimen del flujo en la unión o entrada de la cámara es subcrítico existen ecuaciones analíticas que permiten estudiar el comportamiento del fluido en interacción con su entorno. Pero, cada vez es más común encontrar condiciones de flujo supercrítico a la entrada de la cámara debido a las crecientes demandas y a la baja rugosidad de los materiales poliméricos que se utilizan en la actualidad para la construcción de estas estructuras. Además, en la actualidad, el diseño de cámaras de inspección no tiene en cuenta la presencia de flujo supercrítico debido a que no existe una función analítica que correlacione los distintos parámetros involucrados en el estudio de este tipo de flujos (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

La complicación en estos flujos se debe a la turbulencia, un fenómeno físico y matemático de gran complejidad ocasionado por el efecto de la viscosidad y las altas velocidades, que le confiere al fluido un estado de movimiento caótico y aleatorio que a la fecha solo ha podido ser modelado de manera exacta en casos sencillos, que no tienen la complejidad geométrica de los problemas que normalmente se enfrentan en ingeniería. En consecuencia, se debe recurrir a distintos modelos numéricos de turbulencia que han sido desarrollados para geometría y condiciones de flujo particulares.

En el año 2010, el Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA) realizó una investigación experimental con el fin de “explicar el comportamiento hidráulico de las cámaras de inspección de un sistema de alcantarillado bajo condiciones de flujo supercrítico, y así poder establecer ecuaciones que permitan una metodología de diseño adecuada de estas estructuras” (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

En la actualidad, la manera más común de estudiar y caracterizar el comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico es a través de la experimentación, pero este tipo de aproximación resulta muy costosa. En consecuencia, dado que no existen ecuaciones analíticas que permitan modelar el comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico teniendo en cuenta el fenómeno de la turbulencia, una aproximación matemática requiere utilizar modelos numéricos y herramientas computacionales a fin de lograr un análisis adecuado que permita estudiar la dinámica del flujo a la vez que se economiza en recursos humanos, temporales y técnicos.

Este proyecto de grado busca entonces utilizar algunos de los mecanismos numéricos y computacionales disponibles en la actualidad para simular el flujo con superficie libre que se presenta en las cámaras de inspección de los sistemas de drenaje y alcantarillado de la ciudad de Bogotá y comparar los resultados obtenidos con mediciones experimentales a fin de evaluar distintos modelos computacionales y establecer la validez de los mismos. En primera instancia, se realiza una aproximación a los conceptos básicos de la Mecánica de Fluidos, incluyendo el fenómeno de la turbulencia y las ecuaciones y conceptos físicos de cada uno de los modelos de turbulencia que se utilizarán para llevar a cabo las simulaciones. A continuación, se procede con una introducción al proyecto experimental desarrollado por el CIACUA (Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes) sobre el comportamientos hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico, que llevó al desarrollo de este proyecto, junto con una descripción de la geometría de la cámara de inspección trabajada por el CIACUA y la selección de los escenarios experimentales que se estudiaron y simularon con el uso de la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD). Posteriormente, se realiza un descripción detalla del proceso de simulación, incluyendo la geometría y malla, los parámetros utilizados, las condiciones de frontera y demás. Finalmente, se procede con el análisis de los resultados obtenidos y conclusiones sobre los mismos.

## **1.1. Objetivos**

### ***1.1.1. Objetivo general***

Desarrollar un modelo matemático que corrobore los resultados obtenidos por el CIACUA a partir de los modelos físicos de cámaras de inspección, de manera que se pueda establecer una metodología de diseño confiable para este tipo de estructuras hidráulicas.

### ***1.1.2. Objetivos específicos***

- Simulación de un flujo con superficie libre a través de una cámara de inspección de aguas residuales con CDF para relaciones de llenado superiores al 20% en las tuberías de entrada a la cámara.
- Validación, uso y calibración del modelo computacional implementado a partir de un estudio realizado en el 2010 por la Universidad de los Andes que reporta mediciones realizadas sobre un modelo físico de una cámara de inspección de aguas residuales.
- Comparación de 3 modelos computacionales de turbulencia bajo la evaluación de diferentes parámetros tales como costo computacional, errores respecto a los resultados experimentales, perfiles de flujo, el comportamiento de la capa límite turbulenta en las paredes de la cámara, etc. a fin de establecer cual modelo de turbulencia es más adecuado para la simulación de flujo libre a través de cámaras de inspección.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Dinámica de fluidos computacional

Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (por sus siglas en inglés) se refiere al análisis de sistemas que involucran el flujo de fluidos, la transferencia de calor o fenómenos asociados a estos mediante el uso de simulaciones desarrolladas por computador (H. K. Versteeg, 2007). A pesar de ser una herramienta relativamente reciente, ha demostrado ser de gran utilidad para el desarrollo de la ingeniería. Dentro de sus numerosas aplicaciones se cuenta el diseño de componentes de uso aeroespacial, náutico, aeronáutico y terrestre; el estudio de distintos fenómenos tales como la cavitación, la turbulencia, la combustión y los procesos químicos de mezclado; el estudio y desarrollo de tecnologías para distintas disciplinas como la bioingeniería, la hidráulica, la meteorología y la ingeniería aeroespacial, entre otras.

Como lo explica H. K. Versteeg en su texto sobre CFD (H. K. Versteeg, 2007), la mayoría de códigos comerciales se componen de tres etapas o módulos principales. La primera etapa consiste en el Pre-procesamiento del problema, donde se define la geometría del volumen de control, se lleva a cabo una subdivisión de la geometría en subdominios y/o elementos muy pequeños, se seleccionan los fenómenos físicos y químicos a modelar, se definen las propiedades del fluido y se especifican las condiciones de frontera. La segunda etapa o segundo módulo consiste en la solución del sistema de ecuaciones expresadas de manera algebraica para cada uno de los puntos del dominio generados por la subdivisión en elementos pequeños mediante algún método numérico, como diferencias finitas, elementos finitos o volúmenes finitos. A esta etapa se la conoce como Solucionador. Finalmente, en el último módulo, comúnmente llamado Post-procesamiento, se lleva a cabo la visualización y manipulación de la información producida durante las etapas previas.

Para el desarrollo de este proyecto se hace uso de un programa computacional llamado ANSYS CFX, desarrollado por ANSYS Inc., y que se basa en el método de los volúmenes de control finitos, el método más utilizado en programas de CFD de gran reputación. El profesor Y. Niño de la Universidad de Chile ilustra el método de manera muy adecuada (Niño, 2002):

*“Consideremos una malla de discretización del espacio fluido. En torno a cada punto de esta malla se construye un volumen de control que no se traslapa con los de los puntos vecinos. De esta forma el volumen total de fluido resulta ser igual a la suma de los volúmenes de control considerados. La ecuación diferencial a resolver se integra sobre cada volumen de control, lo cual entrega como resultado una versión discretizada de dicha ecuación. Para realizar la integración se requiere especificar perfiles de variación de la variable dependiente entre los puntos de la malla, de modo de poder evaluar las integrales resultantes. La principal propiedad del sistema de ecuaciones discretizadas resultante, es que la solución obtenida satisface en forma exacta las ecuaciones de conservación consideradas, independientemente del tamaño de la malla.”*

## 2.2. Ecuaciones que gobiernan el flujo

Las ecuaciones fundamentales de la Mecánica de Fluidos se conocen como la ecuación de continuidad, la ecuación de energía y las ecuaciones de momentum, que aplicadas al caso de flujos incompresibles se denominan como "ecuaciones de Navier-Stokes" (Panton, 2005). A continuación se presenta una descripción general de cada una de estas ecuaciones fundamentales.

### 2.2.1. Ecuación de conservación de la masa

La ecuación de continuidad, también conocida como ecuación de conservación de la masa, se deriva del balance de masa en un elemento del flujo, y establece que la tasa de incremento de masa en el elemento debe ser igual a la tasa neta de flujo de masa que sale del elemento. La ecuación general, en notación vectorial, para un punto cualquiera de un fluido es la siguiente.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1.1)$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido en el punto y  $\mathbf{U}$  es el vector de velocidades.

### 2.2.2. Ecuación de conservación de momentum

La ley de conservación de momentum se deriva de la segunda ley de Newton y establece que la tasa de incremento de momentum de una partícula debe ser igual a la suma de las fuerzas sobre la partícula. Mediante la aproximación de Euler se obtiene la siguiente expresión vectorial.

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (1.2)$$

donde el operador  $\otimes$  corresponde al producto tensorial,  $p$  es la presión,  $\mathbf{S}_M$  es la fuente de momentum por unidad de volumen por unidad de tiempo debido a fuerzas ejercidas sobre el cuerpo, y  $\boldsymbol{\tau}$  representa el tensor de esfuerzos viscosos que se relaciona con la tasa de deformación del fluido mediante la ecuación que sigue.

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left( \nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U} \right) \quad (1.3)$$

En la Ecuación 1.3  $\mu$  hace referencia a la viscosidad dinámica y  $\delta$  es la matriz identidad definida por:

$$\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 2.2.3. Ecuación de conservación de la energía

La ecuación de conservación de la energía es fundamental pues todo escenario de flujo debe cumplir con la primera ley de la termodinámica. Lo anterior quiere decir que la tasa de cambio de la energía de una partícula de un fluido debe ser igual a la tasa de calor añadido a la partícula más la tasa de trabajo realizado sobre la partícula. Lo anterior, mediante la aproximación de Euler, se resume en la siguiente ecuación vectorial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{S}_E + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M \quad (1.4)$$

donde  $\lambda$  corresponde a la conductividad térmica,  $\mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M$  representa el trabajo debido a fuentes externas de momentum y  $\mathbf{S}_E$  son las fuentes de energía por unidad de volumen por unidad de tiempo.

### 2.3. Flujo multifásico

El flujo multifásico se presenta cuando hay interacción de dos o más fluidos en el dominio de estudio. Un ejemplo claro son las cámaras de inspección de los sistemas de alcantarillado, pues los sistemas alcantarillado están diseñados para trabajar parcialmente llenos, generalmente bajo relaciones de llenado menores al 75%. Se presenta entonces flujo de agua y aire, tanto en las tuberías de entrada y salida como en la cámara misma. Ambos fluidos están divididos por una interfaz claramente definida. Esto es lo que se conoce como flujo con superficie libre.

El flujo con superficie libre es un caso específico de flujo estratificado en tuberías, pero existe una gran variedad de flujos multifásicos tales como la lluvia, un aerosol o el transporte de sedimentos. Estos últimos se conocen como flujo disperso. La modelación de flujos multifásicos puede ser aproximada mediante varios modelos, pero para el caso específico de flujo segregado, como lo es el flujo con superficie libre, el modelo generalmente utilizado es el Modelo Euleriano-Euleriano (EEM), ya que permite lo siguiente (Bakker, 2002):

- Mezcla y separación de fases.
- Resuelve las ecuaciones de momentum, de continuidad y energía para cada una de las fases y realiza un seguimiento de la fracción de volumen de cada una de las fases.
- Utiliza un único campo de presión para todas las fases.
- Permite transferencia de calor y masa entre las fases.
- Permite resolver las ecuaciones de turbulencia para cada fase.

Como lo explica la guía de modelación de ANSYS CFX (ANSYS Inc., 2010), cada fase tiene un campo de flujo propio e interactúan entre ellos mediante términos de transferencia por la interfaz, como el arrastre. Pero cuando la tasa de transferencia a través de la interfaz es muy alta, las fases en contacto comparten un campo único de flujo, además de otras propiedades como la temperatura y la turbulencia. Este caso particular de flujo se conoce como flujo multifásico homogéneo y permite

realizar simplificaciones importantes sobre el modelo original. Algunas de las aplicaciones del Modelo Homogéneo son las siguientes:

- Flujo bajo el efecto de la gravedad donde las fases están completamente segregadas. Por ejemplo el flujo con superficie libre, donde la interfaz está bien definida.
- Flujo dominado por el arrastre, donde el campo de velocidades de ambas fases se igualan en escalas espaciales muy pequeñas.

En consecuencia, para flujo con superficie libre, como el que se presenta en cámaras de inspección de sistemas de alcantarillado, es adecuado utilizar el Modelo Homogéneo. En la guía teórica de ANSYS CFX (ANSYS Inc., 2010) se puede encontrar información detallada sobre el tratamiento matemático que realiza el Modelo Homogéneo EEM a las ecuaciones fundamentales para problemas de flujo multifásico.

## 2.4. El fenómeno de la turbulencia

Como lo explica White en su texto Fluid Mechanics (White, 2008), en el campo de la Mecánica de Fluidos solo existen unas pocas soluciones particulares conocidas que se derivan de no tener en cuenta fenómenos como la viscosidad o compresibilidad, pero en la realidad son pocas las situaciones en que se presentan flujos bajo estas condiciones ideales. Es más común encontrarse con situaciones en que el efecto de la viscosidad y las altas velocidad producen fenómenos turbulentos que deben ser tenidos en cuenta durante el análisis a fin de obtener resultados coherentes. Ahora, aunque las ecuaciones de Navier-Stokes contemplan el fenómeno de la turbulencia, aún no se sabe si exista una solución o no se conoce la solución analítica de las mismas, y en la actualidad no se cuenta con los recursos computacionales necesarios para intentar resolverlas mediante modelos numéricos. Es entonces necesario recurrir a herramientas computacionales que permiten obtener soluciones aproximadas de las ecuaciones de Navier-Stokes. Pero se debe tener cuidado al manipular estas herramientas, pues debido a la complejidad del fenómeno de la turbulencia los modelos computacionales han sido desarrollados para geometrías y condiciones de flujo particulares, por lo que pueden ser muy precisos en ciertas ocasiones pero en otras pueden resultar inadecuados (White, 2008). De manera que es una práctica común probar varios modelos de turbulencia al estudiar una condición de flujo particular. Algunos de los modelos de turbulencia que existen en la actualidad, en particular aquellos que se utilizan durante el desarrollo de este proyecto son: el modelo  $k-\epsilon$  estándar, el modelo  $k-\epsilon$  RNG y el modelo Wilcox  $k-\omega$ .

### 2.4.1. Consideraciones matemáticas sobre el fenómeno de la turbulencia

En su libro sobre flujo viscoso, White realiza una descripción muy adecuada sobre las características físicas que presenta un flujo turbulento:

- Fluctuaciones en la presión, en las tres componentes del campo de velocidades y en la temperatura cuando hay transferencia de calor.

- Remolinos en un amplio rango de escalas espaciales que se mezclan con y llenan la capa de corte.
- Variación aleatoria en forma particular de las propiedades de un fluido.
- La turbulencia es un fenómeno autónomo, ya que genera remolinos para reemplazar aquellos que se disipan por mecanismos como la viscosidad.
- Los remolinos turbulentos se mueven en las tres direcciones del flujo, ocasionando una rápida difusión de masa, momentum y energía. En consecuencia es un fenómeno de mezcla mucho más fuerte que el que ocurre por acción molecular.

Y explica que es común, en el análisis de la turbulencia, realizar una diferenciación entre el valor promedio en el tiempo y las fluctuaciones de cualquier propiedad de un flujo, a fin de poder estimar los promedios en el tiempo de las propiedades primarias. A continuación se muestra una imagen de variaciones en la velocidad en la dirección de flujo (Dirección X) debido a la turbulencia:

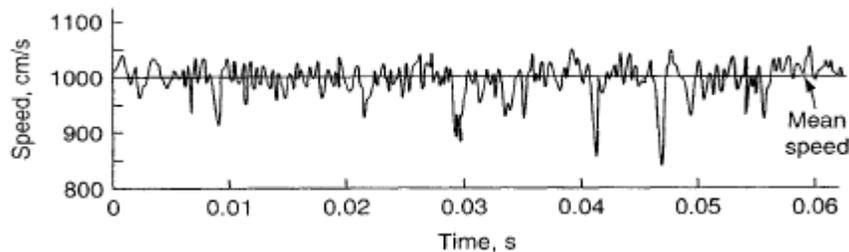


Figura 1: Variaciones en la velocidad. Tomado de (White F. M., 2006).

De la Figura 1, se puede definir la velocidad promedio como:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} U dt \quad (1.5)$$

donde U es la velocidad en cualquier punto y T equivale a un intervalo mayor a cualquier periodo significativo de fluctuaciones en u. Adicionalmente, se define que las fluctuaciones  $u'$  son el residuo de restar la velocidad media en cualquier instante de tiempo.

$$u' = U - \bar{u} \quad (1.6)$$

El promedio de las fluctuaciones en el tiempo debe ser igual a cero,  $\overline{u'} = 0$ . Pero en general el producto del promedio de fluctuaciones en direcciones diferentes ( $\overline{u'v'}, \dots$ ) no es cero, como tampoco lo es el promedio del cuadrado de las fluctuaciones, que se define por la siguiente ecuación.

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u'^2 dt \quad (1.7)$$

Se dice que las fluctuaciones son estáticamente estacionarias cuando las Ecuaciones 1.5 y 1.7 no dependen de  $t_0$ .

De lo anterior es posible definir la energía cinética  $k$  debida a la turbulencia y la “Intensidad de la turbulencia”  $T_i$ . La primera corresponde a la energía cinética total por unidad de masa contenida en las respectivas fluctuaciones de velocidad, mientras que la segunda se refiere a la cantidad relativa de intensidad de la turbulencia en cada una de las direcciones del flujo respecto a una velocidad de referencia denominada  $U_{ref}$ . La energía cinética debida a la turbulencia en cualquier punto del flujo se define como:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (1.8)$$

donde  $v$  corresponde al componente del campo de velocidades en la dirección  $Y$  y  $w$  corresponde a la velocidad en la dirección  $Z$ , dado que el vector de velocidades está definido por  $\mathbf{U} = (U, V, W)$ . Y la intensidad de la turbulencia se relaciona con la energía cinética  $k$  mediante la Ecuación 1.9.

$$T_i = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{U_{ref}} \quad (1.9)$$

En 1895, Osborne Reynolds replanteó las ecuaciones fundamentales para flujo incompresible en términos de las propiedades primarias promediadas en el tiempo, como lo indican las Ecuaciones 1.10.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{U} + \mathbf{u}' & u &= U + u' & v &= V + v' & w &= W + w' \\ p &= P + p' & \varphi &= \Phi + \varphi' \end{aligned} \quad (1.10)$$

El resultado de son las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo, o ecuaciones RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations). Las ecuaciones RANS eliminan las escalas de pequeña resolución y reducen significativamente el costo computacional, pero debido a la no linealidad de las ecuaciones de Navier-Stokes, al promediar las propiedades fundamentales del flujo en el tiempo y reemplazarlas en las ecuaciones fundamentales surgen incógnitas adicionales que deben ser modeladas mediante ecuaciones adicionales, como se verá más adelante. Los términos adicionales se denominan esfuerzos de Reynolds o esfuerzos turbulentos. Se componen de tres esfuerzos normales (Ecuación 1.11) y de tres esfuerzos cortantes (Ecuación 1.12), y son los responsables de las variaciones de la velocidad en cada una de las direcciones del flujo, en consecuencia son los términos responsables de la turbulencia.

$$\tau_{xx} = -\rho \overline{u'^2} \quad \tau_{yy} = -\rho \overline{v'^2} \quad \tau_{zz} = -\rho \overline{w'^2} \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = \tau_{yx} &= -\rho \overline{u'v'} & \tau_{xz} = \tau_{zx} &= -\rho \overline{u'w'} & \tau_{yz} &= \tau_{zy} \\ &= -\rho \overline{v'w'} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Para mayor detalle sobre las ecuaciones RANS, el proceso matemático que lleva al desarrollo de estas, las funciones de correlación para tiempo y espacio o la función de probabilidad de la densidad, referirse al texto de (H. K. Versteeg, 2007).

#### ***2.4.2. Modelación del fenómeno turbulento***

Existen tres maneras de aproximarse a la modelación de la turbulencia. La primera se denomina Simulación Numérica Directa (DNS por sus siglas en inglés) y no es propiamente un modelo ya que resuelve las ecuaciones fundamentales del flujo sin utilizar promedios. De manera que simulaciones de este tipo requieren procesos de enmallados dispendiosos, pues se deben asegurar elementos tan pequeños que puedan resolver las escalas pequeñas de la turbulencia, además de recursos computacionales enormes. La segunda aproximación se denomina LES (Large Eddy Simulation) y consiste en filtrar las ecuaciones que gobiernan el flujo de manera que se resuelve el movimiento turbulento de remolinos de gran escala, mientras que para escalas pequeñas que utiliza un modelo que recrea de manera aproximada la influencia de los pequeños remolinos sobre las variaciones de los parámetros primarios del flujo. Esta aproximación es computacionalmente menos costosa que la DNS, pero aun así requiere muchos recursos para almacenamiento y desarrollo de cálculos en zonas cercanas a las paredes. Finalmente, la aproximación más común en la actualidad y la menos costosa computacionalmente, son los modelos de turbulencia desarrollados en torno a las ecuaciones RANS. Esta aproximación resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo y modela los términos adicionales, conocidos como esfuerzos de Reynolds, mediante diferentes modelos que pueden ser de una, dos o más ecuaciones, dependiendo de la cantidad de ecuaciones diferenciales parciales que se utilicen para resolver estas incógnitas adicionales.

Debido a que la mayoría de modelos computacionales modernos se desarrollan con base en las ecuaciones RANS, y a que el costo computacional de estos modelos es significativamente menor al de las demás aproximaciones, para la simulación de la turbulencia en cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico se seleccionaron los tres modelos de turbulencia de dos ecuaciones que se explican a continuación.

##### *a) Modelo $k$ - $\epsilon$ estándar:*

Este modelo de turbulencia permite introducir efectos tales como el transporte de propiedades de turbulencia por convección y difusión, y la generación y destrucción de la misma. En consecuencia, es sofisticado y general, razón por la cual es el modelo más validado en la actualidad y presenta muy buen desempeño en muchas aplicaciones industriales (Cebeci, 2004) (H. K. Versteeg, 2007).

El modelo  $k$ - $\epsilon$  se enfoca en los mecanismo que afectan la energía cinética turbulenta  $k$ , a través de dos ecuaciones diferenciales parciales que modelan el transporte de  $k$  y la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta  $\epsilon$ . El análisis matemático que lleva al desarrollo de las dos ecuaciones para  $k$  y  $\epsilon$  parte de la suposición que la energía cinética del flujo dada por  $\mathbf{k}_c = K + k$ , donde  $K$  corresponde a la energía cinética promedio, definida por  $K = \frac{1}{2}(\mathbf{U}^2 + \mathbf{V}^2 + \mathbf{W}^2)$ , y  $k$  corresponde a

la energía cinética turbulenta, como se vio anteriormente, puede expresarse matemáticamente a partir de las ecuaciones RANS y de las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes (H. K. Versteeg, 2007).

Las ecuaciones resultantes para la energía cinética turbulenta  $k$  (Ecuación 1.13) y para la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta  $\varepsilon$  (Ecuación 1.14) son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (1.13)$$

(I)            (II)            (III)            (IV)            (V)

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (1.14)$$

(I)            (II)            (III)            (IV)            (V)

donde el término (I) de ambas ecuaciones corresponde a la tasa de cambio de  $k$  o  $\varepsilon$  ( $k$  en la Ecuación 1.1 y  $\varepsilon$  en la Ecuación 1.2), el término (II) corresponde al transporte de  $k$  o  $\varepsilon$  por el fenómeno de convección, el término (III) corresponde al transporte de  $k$  o  $\varepsilon$  por difusión, (IV) es la tasa de producción de  $k$  o  $\varepsilon$  y (V) es la tasa de destrucción de  $k$  o  $\varepsilon$ .  $C_{1\varepsilon}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{1\varepsilon}$  y  $C_{2\varepsilon}$  son constantes ajustables.

b) *Modelo k-ε RNG:*

El modelo  $k$ - $\varepsilon$  tradicional, da buenos resultados al trabajar con flujos simples pero presenta problemas de desempeño cuando se enfrenta a flujos con bajo número de Reynolds, flujos altamente variables en el tiempo, fuertes gradientes de presión adversos y otros. Este modelo, a diferencia del modelo  $k$ - $\varepsilon$  estándar, utiliza una aproximación estadística avanzada conocida como RNG (Renormalization Group) a las ecuaciones de  $k$  y  $\varepsilon$ , logrando representar los efectos de la turbulencia a pequeña escala a través de una función aleatoria forzada en las ecuaciones de Navier-Stokes. Esto permite al modelo ser sensible a deformaciones adicionales causadas por fenómenos tales como curvatura de líneas de flujo y rotaciones, que no pueden ser capturadas por el modelo estándar (H. K. Versteeg, 2007). Lo anterior resulta muy útil en la simulación de cámaras de inspección debido a que se puede presentar recirculación. Las 2 ecuaciones de transporte de este modelo son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot [\alpha_k \mu_{eff} \nabla k] + \tau_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (1.15)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot [\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \nabla \varepsilon] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (1.16)$$

donde:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}$$

y

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Nuevamente,  $C_\mu$ ,  $\alpha_k$ ,  $\alpha_\varepsilon$ ,  $C_{1\varepsilon}$  y  $C_{2\varepsilon}$  son constantes ajustables.

c) *Modelo Wilcox k- $\omega$ :*

Otro problema muy común en la CFD es la simulación aerodinámica, que incluye geometrías complejas y efectos locales a pequeña escala que pueden alterar fuertemente el comportamiento de todo el flujo. Los modelos antes mencionados, en general, son inadecuados para este tipo de situaciones ya que en presencia de gradientes adversos de presión predice niveles muy altos de esfuerzo cortante turbulento que, a su vez, predice niveles excesivos de transferencia de calor en regiones de recomplamiento de flujo (H. K. Versteeg, 2007). Para abarcar este tipo de problemas Wilcox plantea el uso de una variable distinta a  $\varepsilon$ , denominada frecuencia turbulenta  $\omega$ . La relación entre la frecuencia turbulenta y la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta es  $\omega = \varepsilon/k$ , por lo que la viscosidad de remolino está dada por la siguiente relación:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}$$

Los esfuerzos de Reynolds se calculan mediante la aproximación de Boussinesq y las ecuaciones de transporte del modelo son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega \mathbf{U}) \\ = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \gamma_1 \left( 2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3}\rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \\ - \beta_1 \rho \omega^2 \end{aligned} \quad (1.18)$$

donde

$$P_k = \left( 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right)$$

$\sigma_k$ ,  $\sigma_\omega$ ,  $\gamma_1$ ,  $\beta_1$  y  $\beta^*$  son constantes ajustables. Para las Ecuaciones 1.17 y 1.18 es posible realizar un análisis por términos, como con las Ecuaciones 1.13 y 1.14. El resultado es muy similar ya que (I)

corresponde a la tasa de cambio de  $k$  o  $\omega$ , el término (II) corresponde al transporte de  $k$  o  $\omega$  por el fenómeno de convección, el término (III) corresponde al transporte de  $k$  o  $\omega$  por difusión, (IV) es la tasa de producción de  $k$  o  $\omega$  y (V) es la tasa de destrucción de  $k$  o  $\omega$ .

## **2.5. Investigación de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico**

A pesar de que la aproximación numérica o matemática a los fenómenos físicos sea de gran importancia para el estudio y entendimiento de los mismos, la experimentación es fundamental para observar, entender y corroborar la teoría que se desarrolla en torno a cualquier fenómeno físico. Esto es especialmente cierto en el caso de la Mecánica de Fluidos, ya que la complejidad de los fenómenos físicos que ocurren al interior de un flujo son poco fáciles de entender o visualizar. De hecho, en varias circunstancias sucede que la aproximación experimental al fenómeno establece el antecedente a la teoría y la formulación matemática.

En el año 2010, el grupo de investigación CIACUA de la Universidad de los Andes desarrollo una investigación experimental a fin de explicar el comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico y poder establecer una metodología de diseño adecuada y de bajo costo para estas estructuras. En primer lugar se desarrolló un modelo físico a escala de una cámara de inspección convencional a fin de describir los fenómenos hidráulicos que se presentan en la cámara para distintos escenarios de flujo supercrítico. Posteriormente se identificaron los parámetros hidráulicos de mayor importancia y se correlacionaron con patrones característicos observados. Luego, se calcularon las pérdidas de energía que se presentaban en cada escenario de modelación y, finalmente, se establecieron ecuaciones y recomendaciones para el diseño de cámaras de inspección bajo flujo supercrítico (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

### **2.5.1. Modelo hidráulico**

El modelo utilizado en la investigación era una representación a escala 1:2 o 1:3 de un prototipo convencional y consistió en una estructura de conexión conformada por dos tuberías de entrada aguas arriba y una tubería de salida aguas abajo, además de un canal de conducción al interior de la cámara, comúnmente llamado cañuela (ver Figura 3). A continuación se muestra un diagrama del modelo a escala.

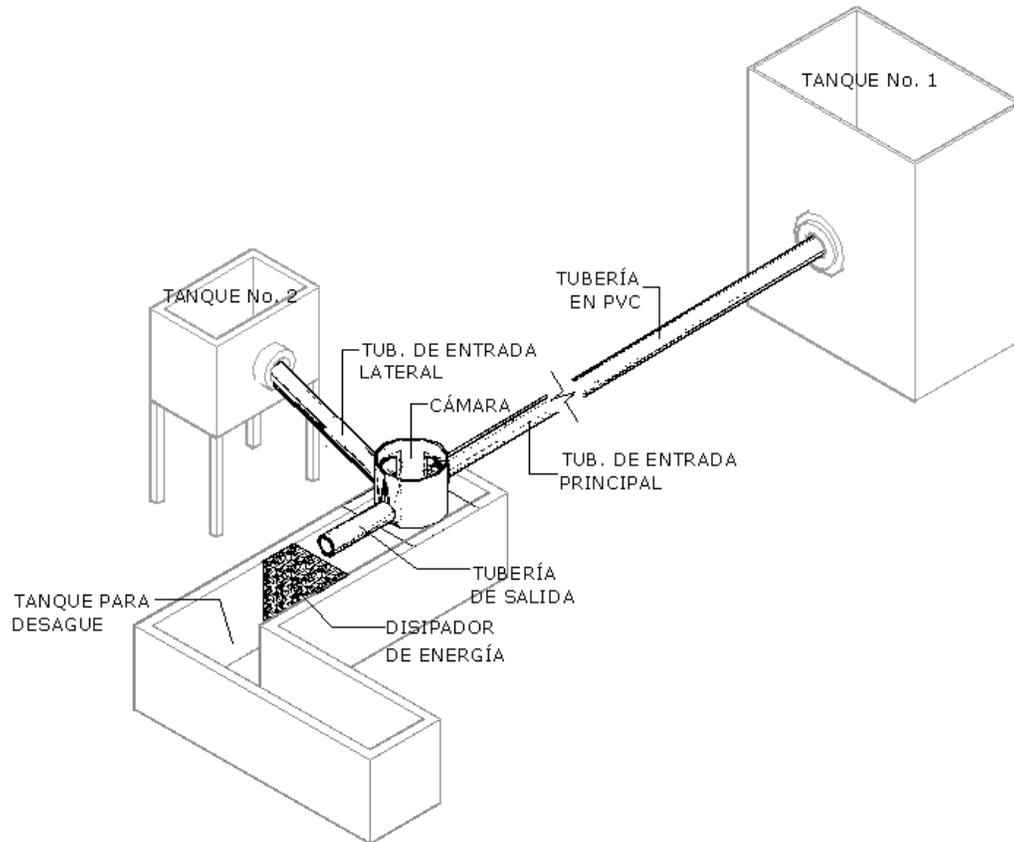


Figura 2: Montaje experimental de la cámara de inspección. Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

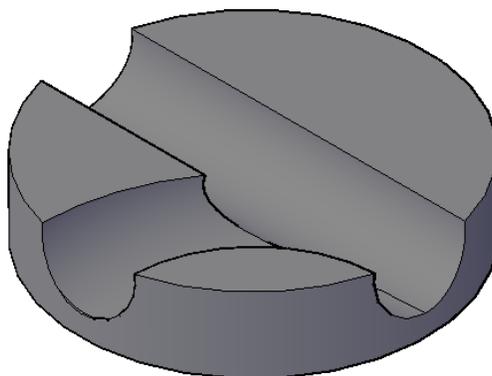


Figura 3: Forma de la cañuela. Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

Como se observa en la Figura 2, el montaje contaba con dos tanque para el suministro de agua (TANQUE No.1 y TANQUE No.2) a las tuberías de entrada y que permitían el control del caudal en cada una de las tuberías a través de vertederos previamente calibrados. Adicionalmente contaba con una tubería de PVC de 250 mm de diámetro de conectaba la tubería de entrada principal con el -Tanque No. 1, una estructura de disipación de energía aguas abajo y un tanque de desagüe.

La tubería de entrada principal a la cámara tenía un diámetro de 223 mm, una longitud de 1.00 m y una pendiente inferior de 2.83%. La tubería de entrada lateral a la cámara estaba ubicada a un ángulo de 90° respecto a la tubería principal y tenía un diámetro de 223 mm, una longitud de 1.40 m y una pendiente inferior de 15.07%. Ambas tuberías tenían la posibilidad de variar su altura de entrada a la cámara, medida desde la parte inferior del tubo con respecto al fondo de la cámara, a cualquiera de las cuatro configuraciones que se indican en la Figura 4. Para el presente proyecto solo es de interés la configuración más baja (0.06 m) que implicaba una condición similar a que no hubiera caída, ya que el fondo de las tuberías de entrada casaba casi perfecto con el fondo del canal de conducción ubicado dentro de la cámara de inspección. La tubería de salida tenía un diámetro de 280 mm, una longitud de 1.00 m y una pendiente inferior de 12.7%. La cámara o estructura de conexión consistió en un cilindro de 850 mm de diámetro y una altura de 0.7 m.

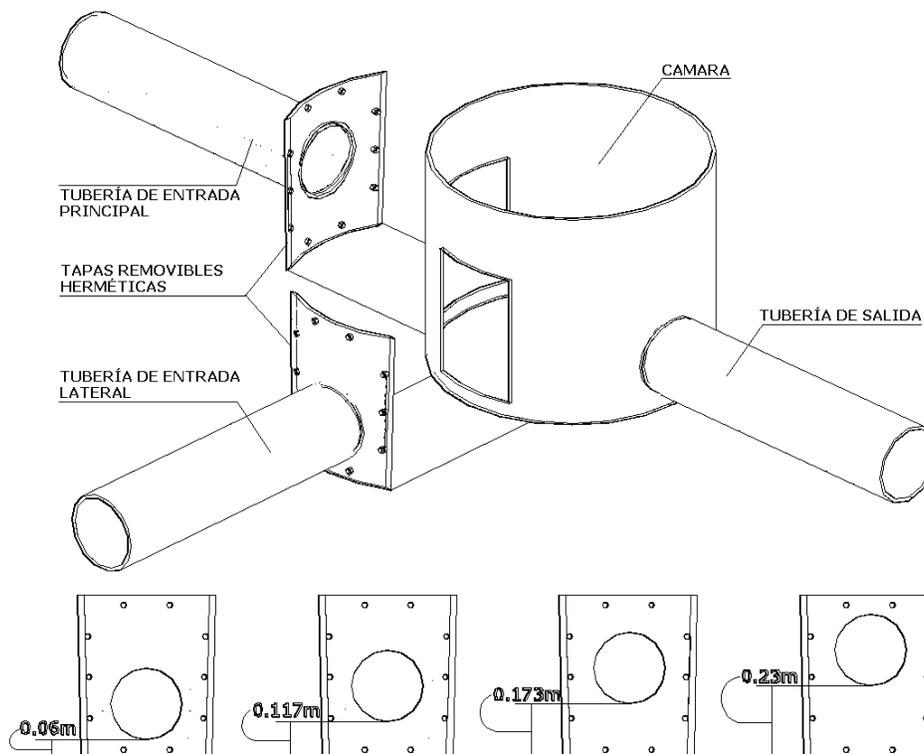


Figura 4: Configuraciones de caídas. Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

Tanto la estructura de la cámara como la cañuela y las tuberías de entrada y salida a la cámara fueron construidas con lámina de acrílico transparente para poder observar el comportamiento del flujo dentro de las tuberías y la cámara, a la vez que se aseguraba una condición de pared lisa.

### ***2.5.2. Instrumentación del modelo y procedimiento de medición***

En cuanto a la instrumentación del modelo, se utilizaron dispositivos de medición de nivel para hacer seguimiento de la altura de la superficie del agua a lo largo de las tuberías de entrada y salida y en distintos puntos dentro de la cámara, a fin de poder estimar las pérdidas de energía que ocurrían al interior de la cámara. También se hizo uso de una cámara fotográfica para registrar las zonas de formación de ondas y las zonas de recirculación. Adicionalmente se utilizaron dispositivos de medición de caudal para calibrar los vertederos y poder asegurar un control adecuado sobre las condiciones del flujo a la entrada de la tubería lateral y principal.

Los dispositivos de medición de nivel eran sensores ultrasonido de alta precisión que traducen señales eléctricas a un programa de computador que convierte estas señales en mediciones de nivel. Las especificaciones de estos sensores son las siguientes (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010):

- Rango de detección: 30 - 400 mm.
- Rango de ajuste: 50 - 400 mm.
- Zona ciega: 0 - 50 mm.
- Estándar: 100 mm \* 100 mm.
- Frecuencia del transductor: aproximada de 310 kHz.
- Retardo de respuesta: aproximada de 50 m.

Los sensores ultrasonido se ubicaron dentro de la cámara y a lo largo de las tuberías de entrada y salida. A lo largo de las tuberías de entrada y salida se ubicaron sobre tres ejes, en puntos de medición cada 0.15 m a lo largo de las tuberías, como se enseña en la Figura 5. Y al interior de la cámara se ubicaron sobre una estructura de medición, también de tres ejes, que simulaba el recorrido del flujo (ver Figura 6).

En cuanto a la instrumentación para la medición de caudales, consistió en un caudalímetro ultrasonido no invasivo que permite realizar mediciones de caudal con una precisión de hasta 0.5%, de manera que se aseguró que los vertederos estuvieran adecuadamente calibrados. A continuación se muestran las especificaciones técnicas del caudalímetro.

- Precisión típica: 0,5%.
- Sistema de medición: bidireccional.
- Tiempo de resolución: 0,1 ns.
- Opción de unidades: desde 1 l/d hasta 100 m<sup>3</sup>/s.
- Medición de volumen: desde 10 ml hasta 100 m<sup>3</sup>.

- Tuberías multicapas: hasta 3 materiales.
- No provoca pérdidas de presión.
- No implica daños a la tubería.
- Opciones de las sondas en instalación: modo V, N y W.

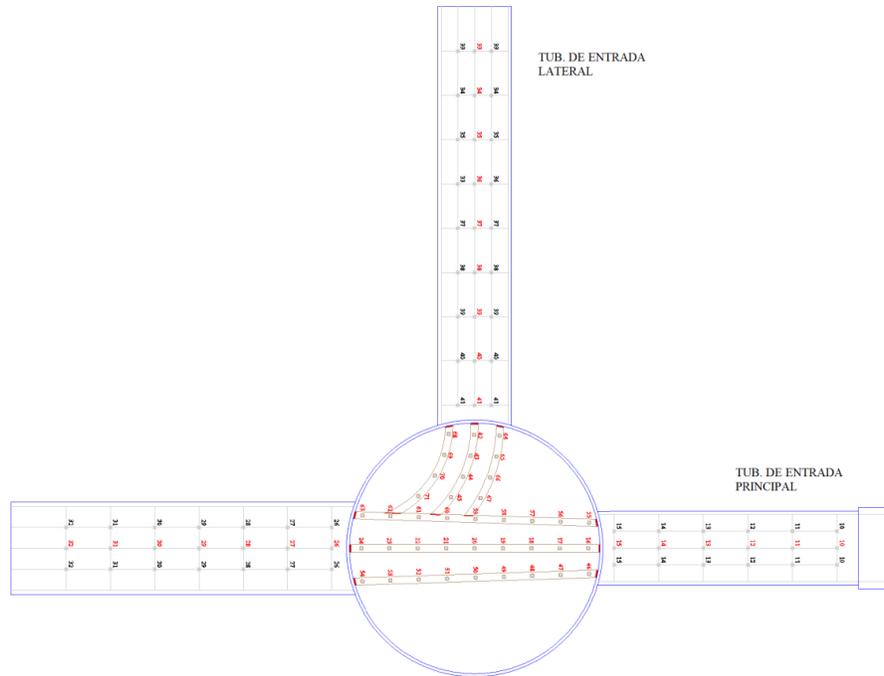


Figura 5: Estructura de medición. Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

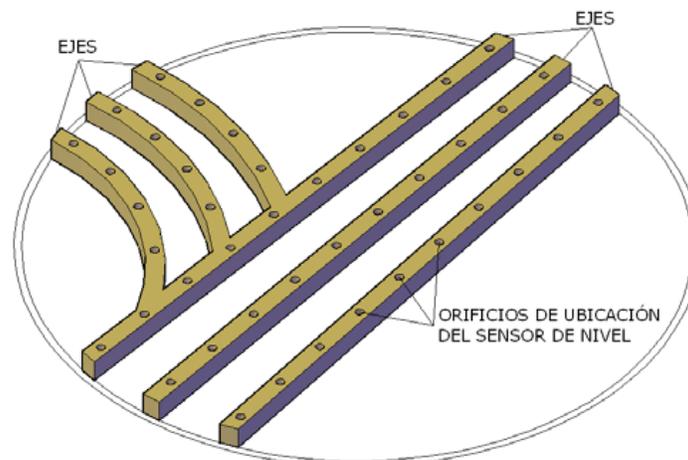


Figura 6: Estructura de medición al interior de la cámara. Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

### **2.5.3. Pruebas sobre el modelo hidráulico**

El modelo de cámara implementado por el CIACUA permitió evaluar condiciones de flujo por la tubería de entrada principal, para la tubería de entrada lateral o por ambas tuberías funcionando al tiempo. De manera que se pudo evaluar el comportamiento hidráulico de la cámara para las siguientes condiciones de flujo:

- Flujo de entrada a la cámara por la tubería principal (Flujo directo o FD).
- Flujo de entrada a la cámara por la tubería lateral (Flujo a 90° o FN).
- Flujo de entrada a la cámara por la tubería principal y por la tubería lateral (Unión de flujos o UF).

Adicionalmente, para cada condición existía la posibilidad de variar la altura de caída de la tubería de entrada, o de las tuberías de entrada según sea el caso.

Entonces, por cada escenario (combinación entre la condición de flujo y la configuración de caída en las tuberías de entrada) se evaluó el comportamiento de la cámara para relaciones de llenado entre el 5% y el 75% (rango habitual de operación de un sistema de alcantarillado) y para caudales que aseguraran condiciones de flujo supercrítico en las tuberías de entrada a la cámara. Para cada escenario se estableció el número de Froude en las tuberías de entrada y se llevó el flujo a un estado estable, esperando por periodos de 10 a 15 minutos hasta que se observara que ninguna de las propiedades medidas variara significativamente en el tiempo. Posteriormente, se procedió a registrar la altura de la superficie en los distintos puntos de medición y se tomaron fotos de los fenómenos relevantes observados.

El resultado fue un total de 188 pruebas en que se registró o calculó el número de Froude ( $Fr$ ) y la relación de llenado en cada una de las tuberías del modelo, donde la relación de llenado está dada por  $Y = Y_n/D_o$  (donde  $Y$  es la relación de llenado de la tubería,  $Y_n$  es la profundidad del flujo y  $D_o$  es el diámetro interno de la tubería). Se registraron las alturas de caída  $s_1$  y  $s_2$  de cada una de las tuberías de entrada, se registró la altura de la superficie en distintos puntos y se calcularon las pérdidas de energía. De todas las pruebas, 23 pruebas se realizaron para condición de Flujo Directo, otras 23 pruebas se realizaron para la condición de Flujo a 90° y, finalmente, se realizaron 142 pruebas para la condición de Unión de Flujos.

A continuación se muestra un escenario de flujo junto con la información registrada y calculada por el CIACUA.

**PRUEBA UF-6**

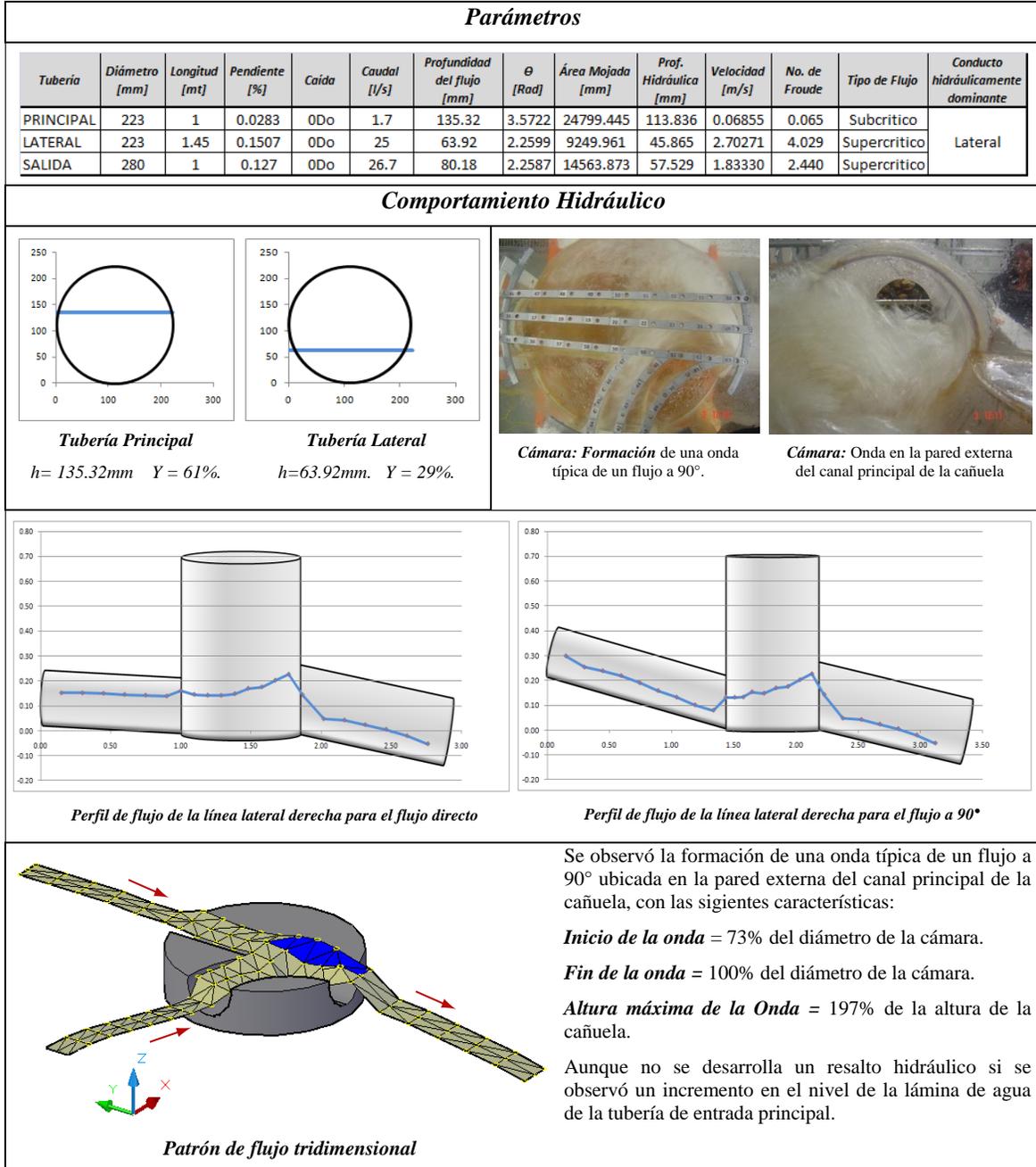


Figura 7: Resultados para escenario UF-6 (Dinámica del flujo). Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

## 2.6. Clasificación de flujos en canales abiertos:

Por último cabe resaltar que en ductos y canales abiertos el flujo se puede clasificar en los siguientes regímenes:

- Laminar - Subcrítico:  $Re < 1000$ ;  $Fr < 1$
- Laminar - Supercrítico:  $Re < 1000$ ;  $Fr > 1$
- Turbulento - Subcrítico:  $Re > 3000$ ;  $Fr < 1$
- Turbulento - Supercrítico:  $Re > 3000$ ;  $Fr > 1$

El número de Reynolds ( $Re$ ) es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas del flujo, de manera que para flujo en ductos y canales abiertos con valores de  $Re < 1000$ , las fuerzas viscosas predominan forzando a un régimen de flujo laminar. Pero si  $Re > 1000$ , las fuerzas inerciales priman sobre las fuerzas viscosidad y comienza a generarse turbulencia. Para  $Re > 3000$  el régimen de flujo es completamente turbulento. La ecuación de  $Re$  es la siguiente.

$$Re = \frac{\rho U D_H}{\mu} = \frac{Q D_H}{\nu A} \quad (1.19)$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $U$  es la velocidad del flujo de aproximación,  $D_H$  es el diámetro hidráulico de la tubería,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $A$  es el área de flujo.

El número de Froude ( $Fr$ ) es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido y permite determinar si el flujo es supercrítico o subcrítico. Está dado por la siguiente ecuación:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}} = \sqrt{\frac{T}{gA^3}} \quad (1.20)$$

donde  $g$  es la aceleración debida a la gravedad,  $D$  es la profundidad hidráulica,  $T$  es el ancho superficial y  $Q$  es el caudal.

En condiciones de flujo subcrítico, las fuerzas de gravedad tienen mayor importancia que las fuerzas inerciales sobre el comportamiento del flujo, por lo que el número de Froude debe ser menor a 1 ( $Fr < 1$ ). Mientras que en condiciones de flujo supercrítico las fuerzas inerciales predominan sobre las fuerzas gravitacionales, en consecuencia se debe cumplir que  $Fr > 1$ .

### 3. SIMULACIÓN Y MODELO COMPUTACIONAL

A fin de desarrollar un modelo computacional capaz de simular adecuadamente el flujo con superficie libre, se inicia un diseño asistido por computador de la cámara de inspección estudiada por el CIACUA. Posteriormente, se realiza una subdivisión del dominio en un número muy pequeño de elementos de flujo, lo que se conoce como enmallado. Luego, se introducen las condiciones de flujo investigadas en el informe del CIACUA y que son de interés para este proyecto y, finalmente, se definen los parámetros o características del flujo que se desean medir y evaluar contra la información experimental con que se cuenta.

En general, la simulación de dominios de flujo de gran tamaño, como es el caso del modelo hidráulico, requiere una gran cantidad de nodos y, en consecuencia, una gran cantidad de elementos de volumen para poder lograr resultados adecuados. El problema de subdividir el dominio de flujo en un número de elementos de volumen elevado es que los costos computacionales para resolver el dominio de flujo serán igualmente elevados. Aún más elevados si se requiere simular periodos físicos de 10 a 15 minutos. En consecuencia, por restricciones de tiempo y recursos computacionales, se utilizó una única configuración de flujo. Esto quiere decir que se desarrolló un único diseño por computador de la cámara de inspección del CIACUA para la condición de caída más baja en ambas tuberías de entrada, pues para poder simular cada una de las 142 pruebas habría sido necesario realizar diseños a computador de cada una de las posibles configuraciones de caída. La configuración seleccionada permitió desarrollar un número adecuado de simulaciones y permitió establecer la validez de utilizar un modelo computacional como aproximación para el diseño y/o estudio de cámaras de inspección.

#### 3.1. Diseño a computador del modelo hidráulico:

Seleccionar adecuadamente el dominio de flujo que se resolverá a través de la CFD es de vital importancia para lograr una aproximación confiable a la realidad. En general, se ha demostrado que una simulación mejora su precisión a medida que se aumenta el número de elementos de volumen en que se subdivide el dominio en estudio, pero también se ha demostrado que los recursos computacionales que se requieren para resolver el dominio es proporcional al número de elementos de volumen. De manera que entre menor sea el dominio, menor será el número de elementos y los recursos computacionales necesarios para asegurar resultados adecuados. Pero, si el dominio seleccionado para simular es muy pequeño en relación al dominio original es posible que se observen resultados sesgados ya que se pueden estar excluyendo fenómenos o regiones de flujo determinantes para el dominio en estudio.

Entonces, a fin de modificar en la menor medida el modelo hidráulico y lograr modelar adecuadamente los fenómenos que ocurren al interior de la cámara de inspección, se seleccionó como dominio de flujo a resolver el conjunto comprendido por la cámara de inspección y las tuberías de entrada y salida en configuración de caída más baja. No se realizó ningún tipo de modificación sobre las medidas originales del modelo hidráulico con excepción de la tubería de

entrada lateral, que se recortó de 1.40 m a 1.00 m de longitud. En resumen, el diseño a computador de la cámara de inspección consiste en:

- Una tubería de entrada principal sin caída, con una longitud de 1.00 m, un diámetro de 223 mm y una pendiente inferior del 2.83%.
- Una tubería de entrada lateral sin caída, a 90° de la tubería de entrada principal, con una longitud de 1.00 m, un diámetro de 223 mm y una pendiente inferior del 15.07%.
- Una tubería de salida con una longitud de 1.00 m, un diámetro de 280 mm y una pendiente inferior del 12.7%.
- Una cámara de inspección con un diámetro de 850 mm, una altura de 0.7 m y una cañuela en el fondo para dirigir el flujo que entra por las tuberías principal y lateral.
- Una cañuela similar a la que se muestra en la Figura 3.

A continuación se enseñan imágenes del diseño computacional de la cámara de inspección.

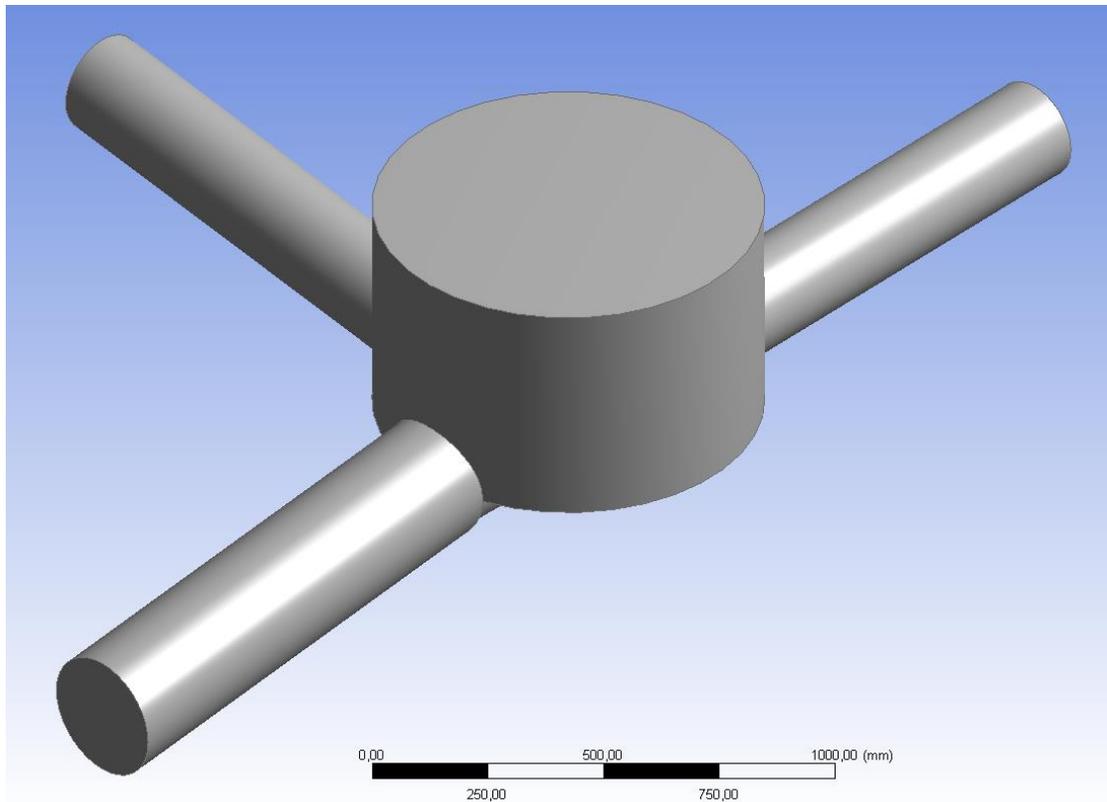


Figura 8: Modelo computacional de la cámara de inspección.

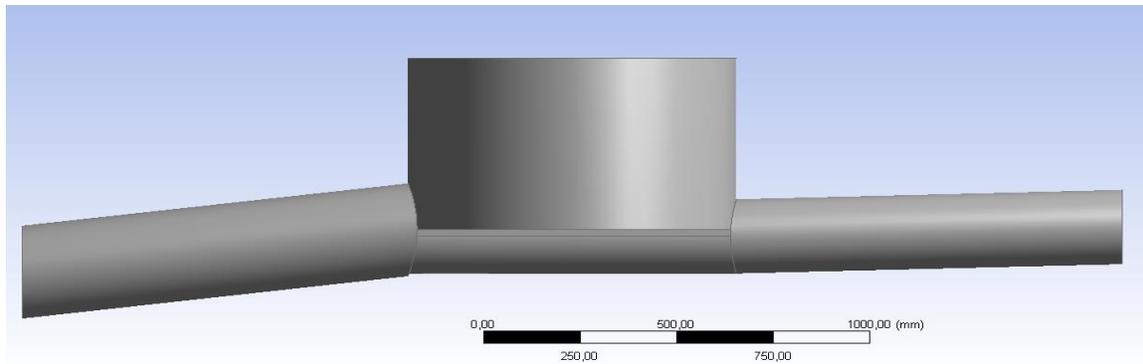


Figura 9: Vista lateral de tubería de entrada principal y tubería de salida.

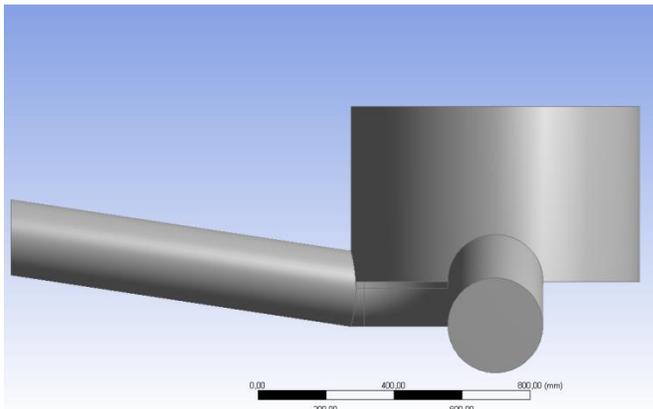


Figura 10: Vista lateral de tubería de entrada lateral.

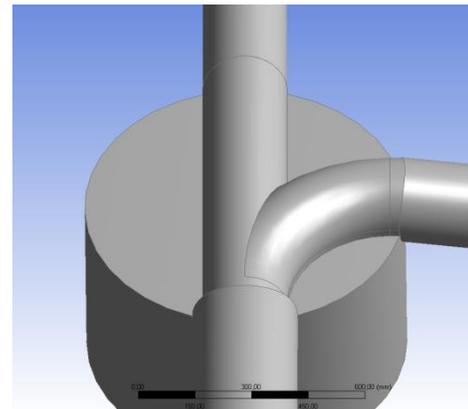


Figura 11: Cañuela del modelo computacional.

Este modelo computacional de la cámara de inspección se desarrolló con el módulo Geometry del programa ANSYS 13.0 Workbench.

### 3.2. Enmallado de la geometría

La subdivisión del dominio en pequeños elementos de volumen es lo que se conoce como creación de la malla o enmallado y es fundamental en el proceso de modelación pues la precisión de los resultados obtenidos depende de la resolución de la malla.

Para realizar el enmallado de la cámara de inspección computacional se hizo uso del módulo Mesh del programa ANSYS 13.0 Workbench. En el proceso se utilizó una función automática de enmallado que contiene el programa y que realiza una partición del dominio en elementos de volumen tetraédricos y elementos de superficie triangulares a partir de cierto parámetros definidos por el usuario. Adicionalmente, se utilizó una función de inflación a partir de las paredes de la cámara y que aumenta la resolución de la malla en las regiones cercanas a la pared, como se muestra en las figuras a continuación.

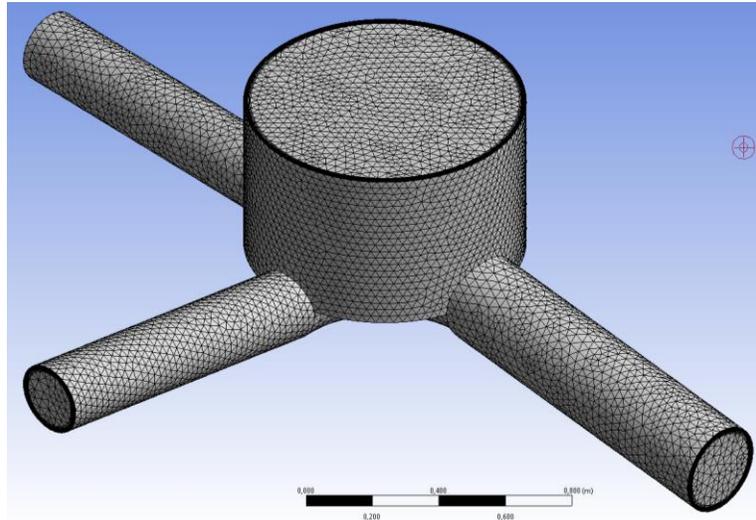


Figura 12: Superficie del enmallado de la cámara de inspección.

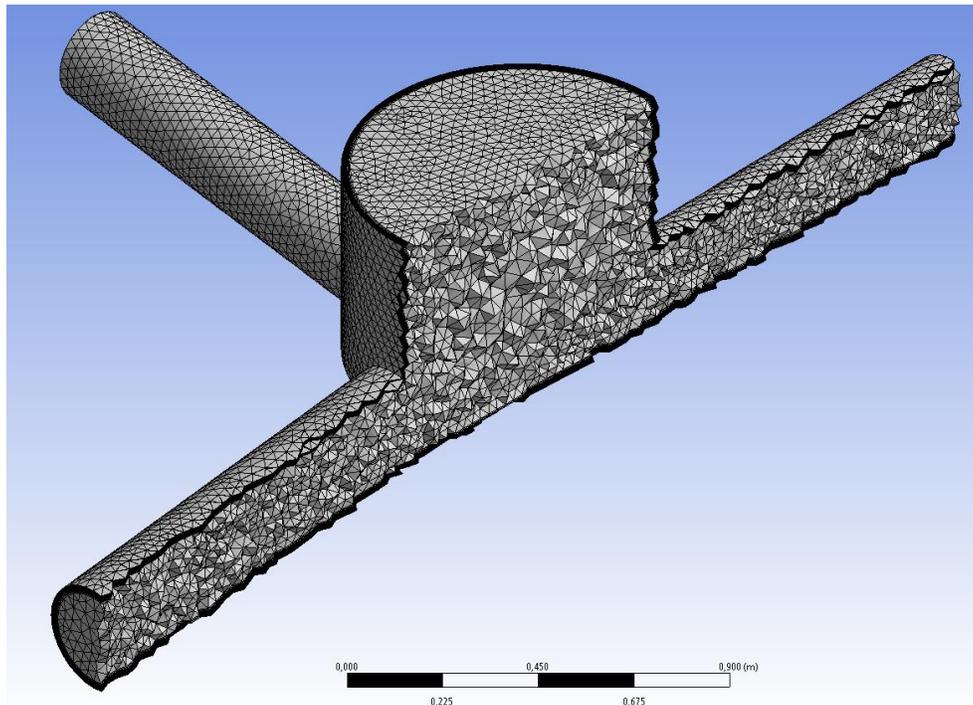


Figura 13: Elementos internos del enmallado.

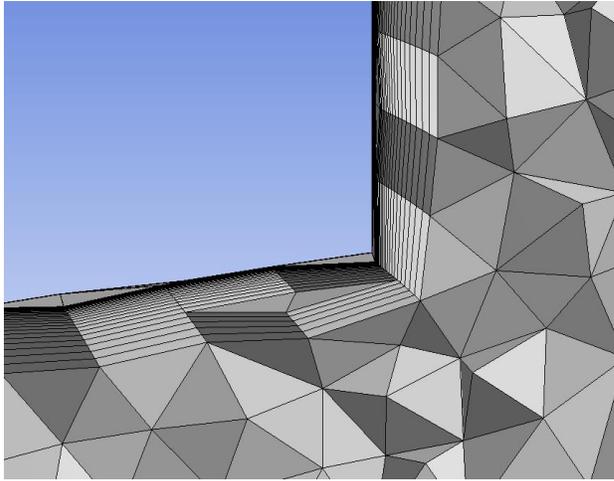


Figura 14: Inflación al interior del dominio.

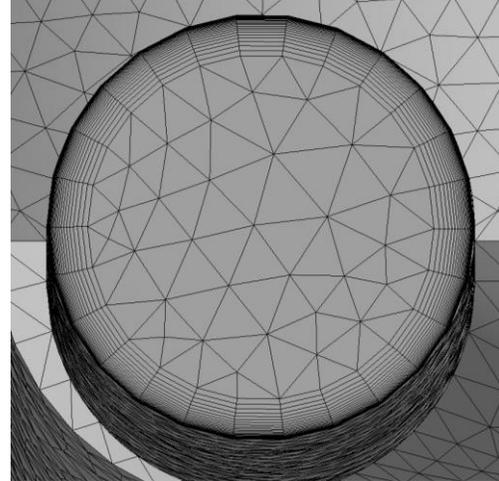


Figura 15: Inflación en tubería de entrada principal

Esta malla cuenta con 199'671 nodos y 495'586 elementos de volumen. En promedio, los elementos tienen un volumen de  $2.32 \text{ cm}^3$ , con un máximo de  $78.12 \text{ cm}^3$  y un mínimo de  $1.47 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$ . No ha sido posible desarrollar una malla de mayor resolución debido a la licencia disponible para realizar las simulaciones, pero la ventaja de esta malla es que permite simular en periodos relativamente cortos, dadas las características del dominio.

### 3.3. Selección de escenarios de modelación

Como se explicó anteriormente las pruebas que pueden ser simuladas a partir del modelo computacional de la cámara de inspección son aquellas realizadas para la condición de caída más baja en las tuberías de entrada a la cámara. De esta manera el número de pruebas a modelar se reduce a 24 (8 pruebas para escenario de FD, 8 pruebas para escenario de FN y 8 pruebas para escenario de UF). Pero, como parte del proyecto es comparar el desempeño de tres modelos de turbulencia a fin de definir cuál es el adecuado para este tipo de simulaciones, cada prueba o escenario de modelación se debe simular tres veces. Lo que quiere decir que se requeriría un total de 72 simulaciones. Entonces, de las 24 pruebas posibles se seleccionaron 10 escenarios de modelación o pruebas a resolver computacionalmente (4 pruebas para escenario de UF, 4 pruebas para escenario de FD y 2 pruebas para escenario de FN), para un total de 30 simulaciones.

Nuevamente, las condiciones geométricas de las tuberías de entra y salida son:

**Tabla 1: Tuberías de entrada y salida a la cámara de inspección. Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).**

<i>Tubería</i>	<i>Diámetro [mm]</i>	<i>Longitud [mt]</i>	<i>Pendiente [%]</i>	<i>Caída</i>
PRINCIPAL	223	1	2.83%	0Do
LATERAL	223	1.45	15.07%	0Do
SALIDA	280	1	12.70%	0Do

La Tabla 1 es tomada del informe del CIACUA, por lo que aparece una longitud de 1.45 m para la tubería lateral. Aun así se simula con una tubería lateral de 1.00 m.

En las Tablas 2, 3 y 4 mostradas a continuación se enumeran los escenarios de modelación tomados de las pruebas realizadas por el CIACUA. En cada tabla aparecen los parámetros de entrada y condiciones de frontera.

**Tabla 2: Pruebas a simular, escenario Unión de flujos (UN). Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).**

UF-2	<i>Caudal [L/s]</i>	<i>Profundidad de flujo [mm]</i>	<i>Relación de llenado [%]</i>	$\theta$ [Rad]	<i>Área Mojada [mm]</i>	<i>Prof. Hidráulica [mm]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>No. De Froude</i>	<i>No. De Reynolds</i>	<i>Tipo de Flujo</i>
	24.75	82.28	37%	2.61	13086.91	60.812	1.89	2.45	1.01E+06	Sup-Turb
	13.03	52.19	23%	2.02	6956.37	36.838	1.87	3.12	1.29E+06	Sup-Turb
	37.78	95.11	-	2.49	18436.66	69.516	2.05	2.48	1.44E+06	Sup-Turb
UF-3	<i>Caudal [L/s]</i>	<i>Profundidad de flujo [mm]</i>	<i>Relación de llenado [%]</i>	$\theta$ [Rad]	<i>Área Mojada [mm]</i>	<i>Prof. Hidráulica [mm]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>No. De Froude</i>	<i>No. De Reynolds</i>	<i>Tipo de Flujo</i>
	50	104.19	47%	3.01	17899.52	80.440	2.79	3.14	1.29E+06	Sup-Turb
	1.7	49.87	22%	1.97	6521.93	35.093	0.26	0.44	1.84E+05	Sub-Turb
	51.70	81.39	-	2.28	14869.60	58.477	3.48	4.59	2.67E+06	Sup-Turb
UF-4	<i>Caudal [L/s]</i>	<i>Profundidad de flujo [mm]</i>	<i>Relación de llenado [%]</i>	$\theta$ [Rad]	<i>Área Mojada [mm]</i>	<i>Prof. Hidráulica [mm]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>No. De Froude</i>	<i>No. De Reynolds</i>	<i>Tipo de Flujo</i>
	13.03	125.54	56%	3.39	22651.54	102.392	0.58	0.57	2.36E+05	Sub-Turb
	13.03	51.14	23%	2.00	6758.98	36.047	1.93	3.24	1.35E+06	Sup-Turb
	26.06	77.59	-	2.22	13909.67	55.497	1.87	2.54	1.48E+06	Sup-Turb
UF-5	<i>Caudal [L/s]</i>	<i>Profundidad de flujo [mm]</i>	<i>Relación de llenado [%]</i>	$\theta$ [Rad]	<i>Área Mojada [mm]</i>	<i>Prof. Hidráulica [mm]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>No. De Froude</i>	<i>No. De Reynolds</i>	<i>Tipo de Flujo</i>
	13	193.00	87%	4.78	35920.76	236.035	0.36	0.24	1.06E+05	Sub-Turb
	25	132.28	59%	3.52	24135.54	110.161	1.04	1.00	4.11E+05	Sub-Turb
	38.00	105.98	-	2.65	21357.66	78.634	1.78	2.03	1.17E+06	Sup-Turb

El tipo de flujo hace referencia a los cuatro regímenes explicados en el Numeral 3.6, donde Sup-Turb corresponde a flujo en régimen Supercrítico-Turbulento y Sub-Turb corresponde a flujo en régimen Subcrítico-Turbulento.

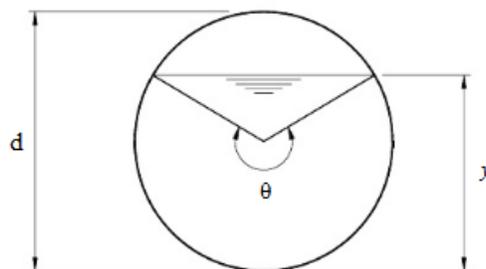
**Tabla 3: Pruebas a simular, escenario Flujo Directo (FD). Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).**

FD-3	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	$\theta$ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	25.51	67.21	30%	2.32	9918.66	48.47	2.57	3.73	1.54E+06	Sup-Turb
	25.51	55.40	-	1.84	8633.75	38.70	2.95	4.80	2.81E+06	Sup-Turb
FD-4	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	$\theta$ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	47.38	96.61	43%	2.87	16217.78	73.38	2.92	3.44	1.42E+06	Sup-Turb
	47.38	74.38	-	2.17	13111.11	53.01	3.61	5.01	2.92E+06	Sup-Turb
FD-6	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	$\theta$ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	73.84	127.59	57%	3.43	23105.01	104.71	3.20	3.15	1.30E+06	Sup-Turb
	73.84	93.39	-	2.46	17981.00	68.10	4.11	5.02	2.92E+06	Sup-Turb
FD-8	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	$\theta$ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	52.22	92.50	41%	2.7992	15312.611	69.685	3.41026	4.125	1.699E+06	Sup-Turb
	52.22	58.30	-	1.8954	9286.975	40.843	5.62293	8.883	5.193E+06	Sup-Turb

**Tabla 4: Pruebas a simular, escenario Flujo a 90° (FN). Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).**

FN-7	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	$\theta$ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	50.5	143.77	64%	3.73	26622.41	124.72	1.90	1.71	7.09E+05	Sup-Turb
	50.5	184.19	-	3.78	42952.64	161.67	1.18	0.93	5.44E+05	Sub-Turb
FN-8	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	$\theta$ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	40	89.06	40%	2.74	14559.24	66.65	2.75	3.40	1.40E+06	Sup-Turb
	40	101.69	-	2.59	20196.77	74.99	1.98	2.31	1.34E+06	Sup-Turb

La profundidad del flujo  $y$  o normal ( $y_n$ ) corresponde al promedio de las últimas dos mediciones de la altura de la superficie antes de entrar a la cámara,  $\theta$  es el ángulo en radianes formado desde la superficie el agua hasta el centro de la tubería (ver Figura 16), el área mojada  $A_m$  está dada por la Ecuación 1.21, la profundidad hidráulica  $D$  está dada por la Ecuación 1.22 y la velocidad está dada por la relación  $U = Q/A_m$ , donde  $Q$  es el caudal.



**Figura 16: Relaciones geométricas para tubería parcialmente llena.**

$$A_m = \frac{1}{8}(\theta - \sin \theta) * d^2 \quad (1.21)$$

$$D = \frac{1}{8} \left( \frac{\theta - \sin \theta}{\sin \theta / 2} \right) * d \quad (1.22)$$

donde  $d$  es el diámetro de la tubería y  $\theta$  está en radianes.

Entonces, para cada una de las pruebas enseñadas en las Tablas 2 a 4 (UF-2, UF-3, UF4, UF5, FD3,...) se realizan tres simulaciones, una por cada modelo de turbulencia utilizado.

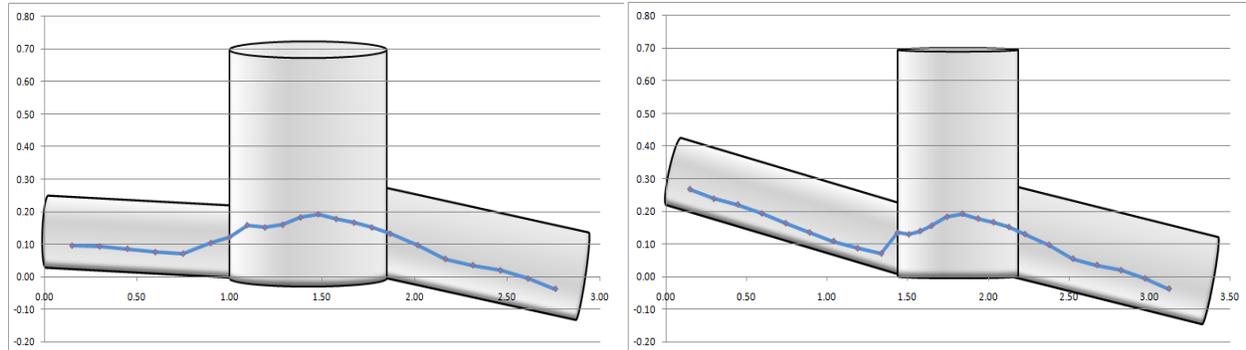
### 3.4. Definición de las condiciones de frontera

Ya se definió la geometría y malla del modelo computacional y se definieron los escenarios o pruebas simuladas. Solo queda por definir las variables de entrada y las variables de salida. Como variables de entrada se entienden los parámetros y condiciones de frontera que se toman de las pruebas experimentales y se aplican al modelo computacional en la etapa de Pre-procesamiento, mientras que las variables de salida se refieren a la información arrojada por la solución del modelo computacional y que se quiere comparar con la información experimental. De esta manera es posible realizar un análisis cualitativo y cuantitativo del modelo computacional desarrollado y establecer la validez del mismo.

Las variables de entrada para el modelo en cada uno de los escenarios de modelación son la velocidad y la altura de la superficie en cada una de las tuberías de entrada, la altura de la superficie en la tubería de salida, la escala física de tiempo por iteración, el número de iteraciones a realizar y, por último, el modelo de turbulencia a utilizar. En cuanto a las variables de salida, se requieren los perfiles de flujo en los planos establecidos en el informe experimental (ver Figura 17), el tiempo de simulación, e información cualitativa como el comportamiento de los residuos durante el proceso de solución, imágenes de la superficie al final de la simulación, o remolinos en la cámara de inspección. En la tabla a continuación se enumeran las variables de análisis.

Tabla 5: Variables de entrada y variables de salida para los modelos conceptuales.

Variables de entrada	Escenario								
	UF			FD			FN		
	U, h <sub>superficie</sub> , Δt, #iteraciones			U, h <sub>superficie</sub> , Δt, #iteraciones			U, h <sub>superficie</sub> , Δt, #iteraciones		
	k - ε	k - ε rng	k - ω	k - ε	k - ε rng	k - ω	k - ε	k - ε rng	k - ω
Variables de salida	Perfiles de flujo, Tiempo de simulación Información cualitativa			Perfiles de flujo, Tiempo de simulación Información cualitativa			Perfiles de flujo, Tiempo de simulación Información cualitativa		



*Perfil recto de flujo por línea central.*

*Perfil curvo de flujo por línea central.*

**Figura 17: Perfiles recto y curvo de flujo en UF-2.**

Las curvas que se observan en la Figura 17 son los perfiles recto y curvo de flujo o altura de la superficie a lo largo de la estructura de medición, que van desde el inicio de las tuberías de entrada principal y lateral y llegan hasta el final de la tubería de salida, pasando por la cámara de inspección. Perfil recto de flujo se refieren a las líneas de medición que recorren la tubería de entrada principal y terminan en la tubería de salida, mientras que perfil curvo de flujo se refieren a las líneas de medición que inician en la tubería lateral, doblan a la derecha dentro de la cámara y se dirigen hacia el final de la tubería de salida. "Línea central" hace referencia al eje de medición utilizado. Como se mencionó anteriormente, la estructura de medición consiste en tres ejes de medición para cada una de las tuberías, como lo muestra la Figura 5. De manera que los tres ejes se diferencian mediante "línea central", "línea derecha" y "línea izquierda". Las abscisas corresponden al recorrido del agua por las tuberías de entrada, la cámara y la tubería de salida, de manera que a 1.00 m sobre la gráfica de perfil recto de flujo y a 1.45 m sobre la gráfica de perfil curvo de flujo ingresa el perfil de flujo a la cámara de inspección. Las ordenadas corresponden a la medida de la altura de la superficie o del perfil de flujo relativo al fondo de la cámara; es por esta razón que se observan valores negativos hacia el final de la tubería de salida (el nivel del fondo del canal se encuentra a 0.135 m aproximadamente por encima del punto más bajo de la tubería de salida).

En cuanto a las fronteras, el dominio está constituido por cinco. Dos entradas de velocidad (tubería de entrada lateral y tubería de entrada principal) que permiten entrada de flujo de masa, restringen salida de flujo de masa y requieren de la velocidad de entrada del flujo en cada una de las coordenadas cartesianas y de la altura de la superficie para calcular las fracciones de volumen de cada una de las fases a la entrada. Una salida de presión (tubería de salida) que permite el flujo libre de masa hacia afuera del dominio a una condición de presión atmosférica y requiere el perfil de presiones de la lámina de agua en función de la altura, además de la altura de la superficie para calcular las fracciones de volumen de cada una de las fases y el perfil de presiones a la salida. Otra salida abierta a la atmósfera (hueco superior de la cámara) que permite circulación libre de aire, o sea que permite tanto que entre como que salga flujo sin ningún tipo de restricción. Y, finalmente, las paredes de la cámara de inspección son lisas y operan bajo condición de no deslizamiento debido a que el material original del modelo físico es acrílico. Para todos los escenarios de



---

modelación se utilizó una intensidad de turbulencia media (Intensidad de turbulencia del 5% y relación de viscosidad  $\frac{\mu_t}{\mu} = 10$ ) como condición inicial ya que es la condición recomendable para ductos y sistemas de ventilación (ANSYS Inc., 2010).

## 4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones llevadas a cabo para cada uno de los escenarios de flujo seleccionados en el capítulo anterior. Se enseñan las variables de entrada de todos los escenarios y algunos de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones. El conjunto de resultados analizados en cada escenario de modelación consiste en imágenes de la superficie del flujo según cada modelo de turbulencia y los perfiles de flujo sobre cada uno de los planos establecidos por los ejes de medición del modelo hidráulico experimental.

Las gráficas e imágenes que no se enseñan en esta sección se encuentran en Anexos, pero se realizarán comentarios de todo lo observado en el análisis de los resultados.

**Tabla 6: Parámetros temporales de simulación.**

	UF-2	UF-3	UF-4	UF-5	FD-3	FD-4	FD-6	FD-8	FN-7	FN-8
<b>Paso de tiempo, <math>\Delta t</math> (s):</b>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
<b># iteraciones:</b>	1500	1500	1500	1500	400	400	400	400	400	400
<b>Tiempo físico (min):</b>	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00

En la Tabla 6 se enseñan los pasos de tiempo de cada iteración, el número total de iteraciones realizadas en cada simulación y el tiempo físico simulado. Adicionalmente, en la Tabla 7 se indica el costo computacional o tiempo que las simulaciones en un computador de escritorio con procesador Intel i7 de 3.60Hz y memoria RAM de 16.0Gb.

**Tabla 7: Tiempos de simulación para cada escenario.**

Escenario:	TIEMPO REAL DE SIMULACIÓN (h)									
	UF-2	UF-3	UF-4	UF-5	FD-3	FD-4	FD-6	FD-8	FN-7	FN-8
<b>Modelo k - <math>\epsilon</math>:</b>	8.06	8.22	8.11	8.14	1.96	1.99	2.00	1.99	1.99	1.99
<b>Modelo k - <math>\epsilon</math> rng:</b>	8.21	8.27	8.15	8.18	1.99	2.04	1.99	2.04	1.98	2.04
<b>Modelo k - <math>\omega</math>:</b>	8.37	8.33	8.35	8.25	2.04	2.00	2.01	1.99	1.96	1.99

### 4.1. Escenarios de modelación para Unión de flujos (UF)

Los perfiles de flujo se obtuvieron de graficar la superficie del flujo sobre planos de corte que corren en la dirección de los ejes de medición, de manera que para graficar los perfiles de flujo que se observan en las Gráficas 1 a 3 se trazó un plano como el que se muestra en la Figura 18 y se graficaron los puntos de la superficie del agua sobre este plano. En cuanto a los perfiles a 90° (Gráficas 4 a 6), como no es posible fabricar un plano que se curve y siga la trayectoria de los ejes de medición que se observan en la Figura 5, se cruzaron dos planos de corte como se indica en la

Figura 19. Esto permite hacer un seguimiento adecuado del perfil del flujo a lo largo de la tubería de entrada lateral y a lo largo de la tubería de salida pero presentan inconvenientes en cierta zona al interior de la cámara. Esto se ve reflejado en los cambios bruscos que ocurren en la abscisa 1.65 m, en las gráficas de perfiles curvos de flujo, y por lo tanto no se espera que la predicción de CFD sea correcta en esta zona.

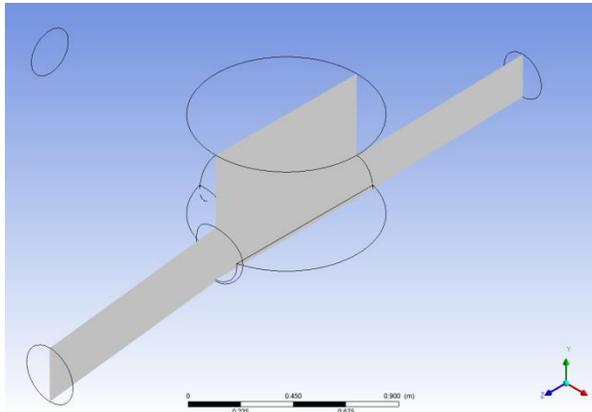


Figura 18: Plano de corte para perfil recto de flujo por línea central

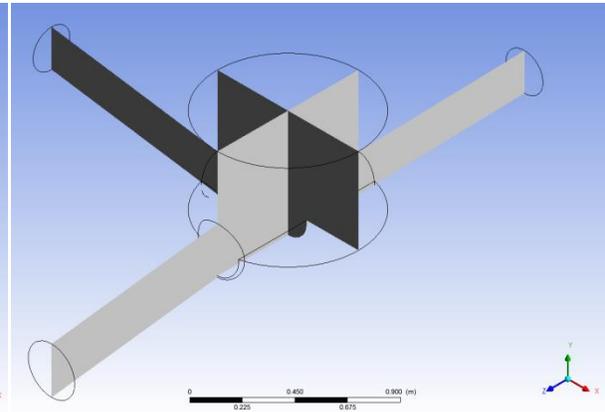


Figura 19: Planos de corte para perfil curvo de flujo por línea central

A continuación se presentan los parámetros de modelación para los escenarios en condición de Unión de Flujos, junto con el tipo de flujo que se presenta en cada una de las tuberías de la cámara. En las Tablas 8 a 11 es claro que el flujo supercrítico es predominante en estos escenarios de modelación, por lo que es necesario tener en cuenta los efectos de la turbulencia debido al valor del número de Reynolds.

Tabla 8: Condiciones de flujo para UF-2.

UF-2	Caudal [L/s]	Profundidad de flujo [mm]	Relación de llenado [%]	Velocidad [m/s]	No. De Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	24.75	82.28	37%	1.89	2.45	1.01E+06	Sup-Turb
	13.03	52.19	23%	1.87	3.12	1.29E+06	Sup-Turb
	37.78	95.11	-	2.05	2.48	1.44E+06	Sup-Turb

Tabla 9: Condiciones de flujo para UF-3

UF-3	Caudal [L/s]	Profundidad de flujo [mm]	Relación de llenado [%]	Velocidad [m/s]	No. De Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	50	104.19	47%	2.79	3.14	1.29E+06	Sup-Turb
	1.7	49.87	22%	0.26	0.44	1.84E+05	Sub-Turb
	51.70	81.39	-	3.48	4.59	2.67E+06	Sup-Turb

Tabla 10: Condiciones de flujo para UF-4.

UF-4	Caudal [L/s]	Profundidad de flujo [mm]	Relación de llenado [%]	Velocidad [m/s]	No. De Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	13.03	125.54	56%	0.57	0.57	2.36E+05	Sub-Turb
	13.03	51.14	23%	1.93	3.24	1.34E+06	Sup-Turb
	26.06	77.59	-	1.87	2.54	1.48E+06	Sup-Turb

Tabla 11: Condiciones de flujo para UF-5.

UF-5	Caudal [L/s]	Profundidad de flujo [mm]	Relación de llenado [%]	Velocidad [m/s]	No. De Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	13	193.00	87%	0.36	0.24	1.06E+05	Sub-Turb
	25	132.28	59%	1.04	1.00	4.11E+05	Sub-Turb
	38.00	105.98	-	1.78	2.03	1.17E+06	Sup-Turb

Las siguientes figuras y gráficas son el conjunto de resultados de un escenario tipo para escenarios de modelación UF. Como se mencionó anteriormente, se compone de la superficie del flujo y de los perfiles de flujo.

Las figuras a continuación enseñan la superficie del flujo al final de la simulación según cada modelo de turbulencia utilizado. En estas figuras y en todas las que siguen las flechas hacen referencia a la dirección del flujo en cada una de las tuberías de la cámara de inspección.

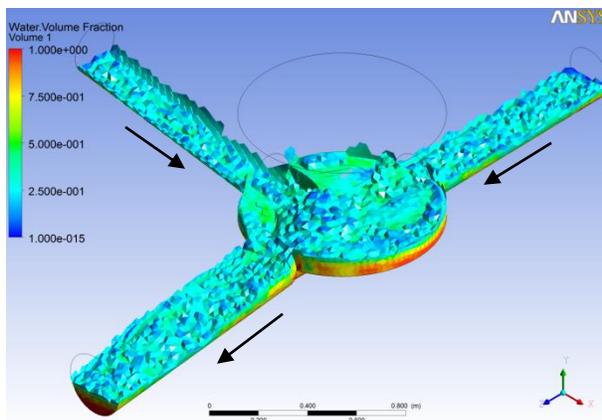


Figura 20: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k-ε estándar.

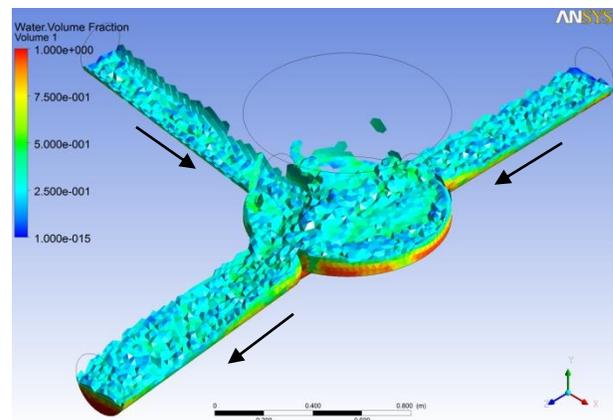


Figura 21: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k-ε RNG.

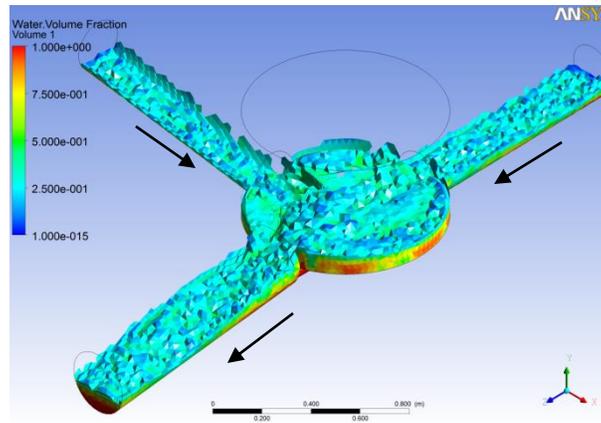
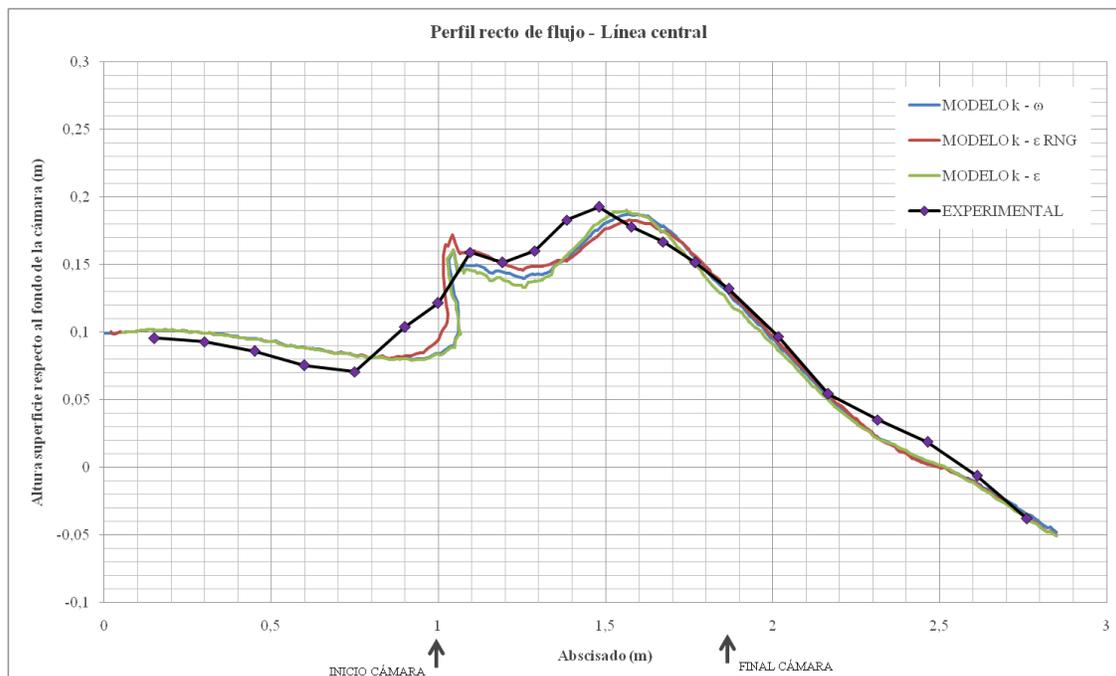


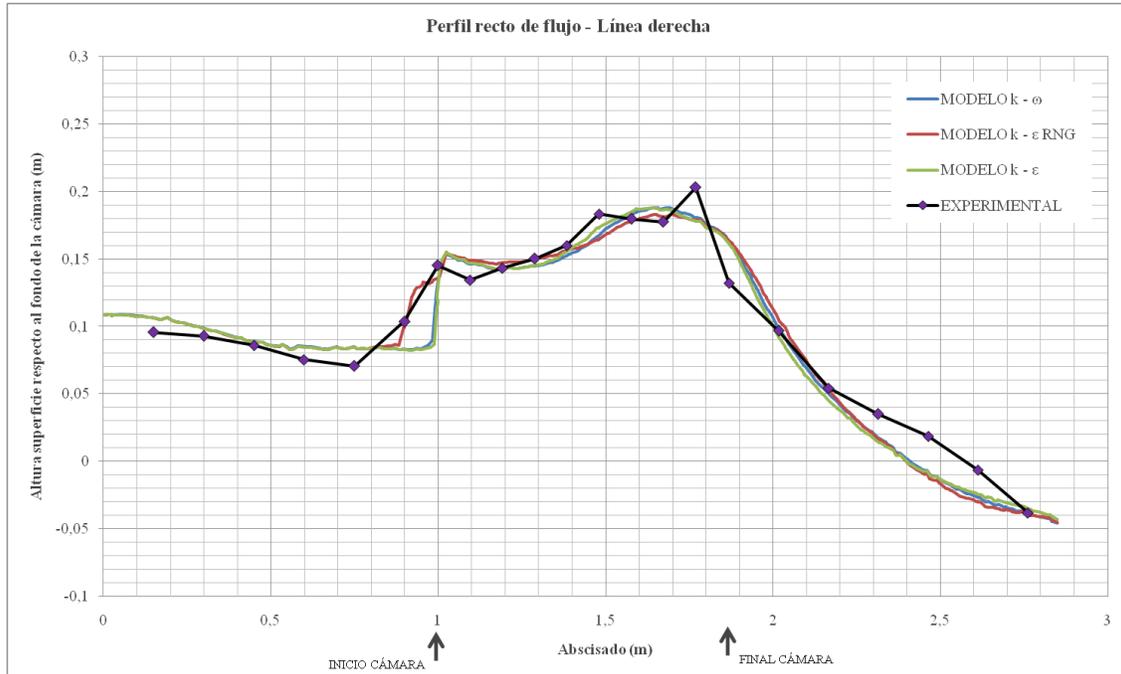
Figura 22: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k- $\omega$ .

En las Figuras 20 a 22 no es posible resaltar diferencias importantes entre los modelos de turbulencia utilizados. De hecho, es un comportamiento común entre los distintos escenarios de modelación observar que la superficie del flujo no varíe significativamente entre los distintos modelos de turbulencia utilizados.

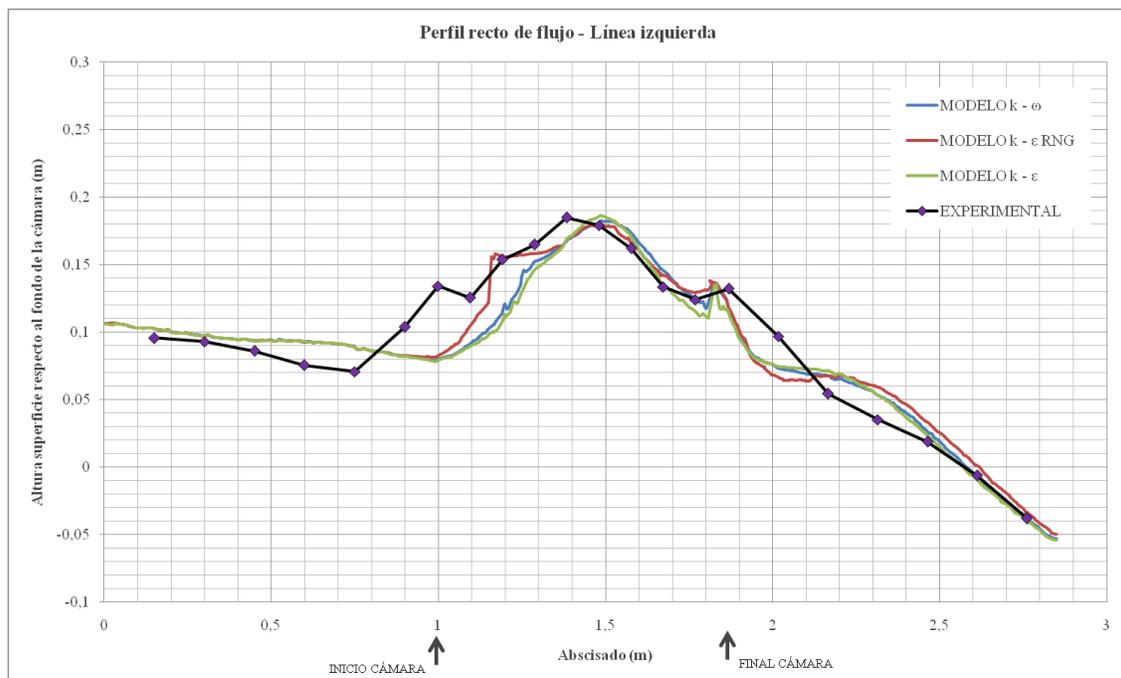
En las Gráficas 1 a 6 se observan los perfiles de flujo a través de la tubería de entrada principal y los perfiles de flujo a través de la tubería de entrada lateral. Las curvas continuas corresponden a cada uno de los modelos de turbulencia utilizados en la modelación de este escenario de flujo.



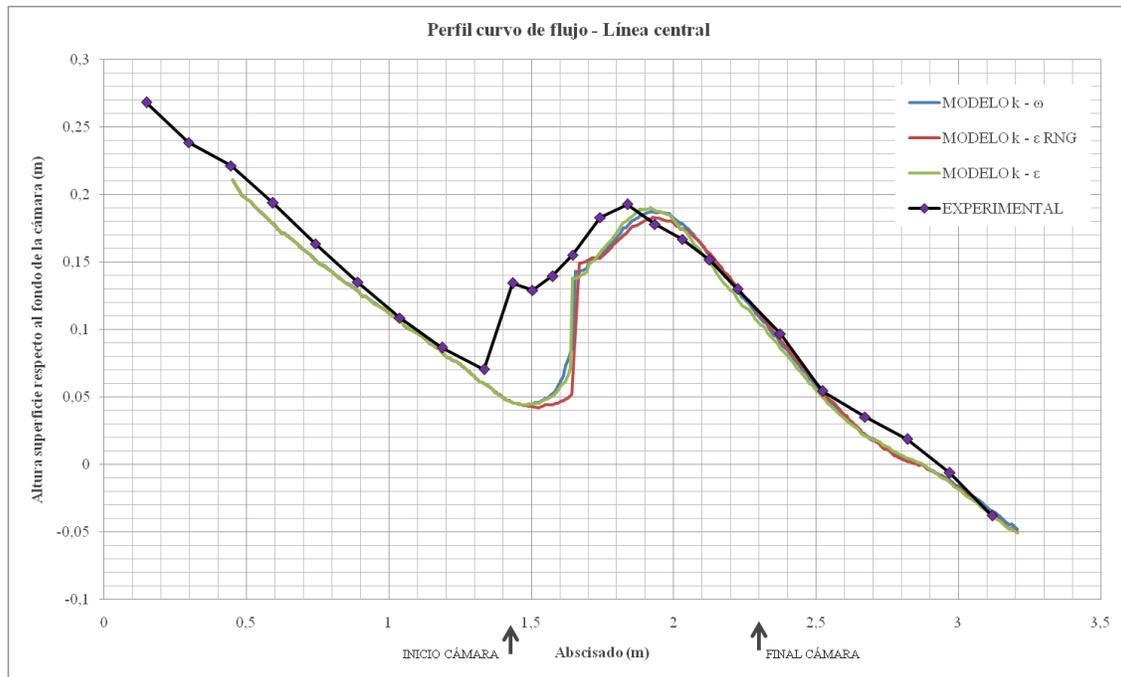
Gráfica 1: Perfil recto de flujo por la línea central para UF-2.



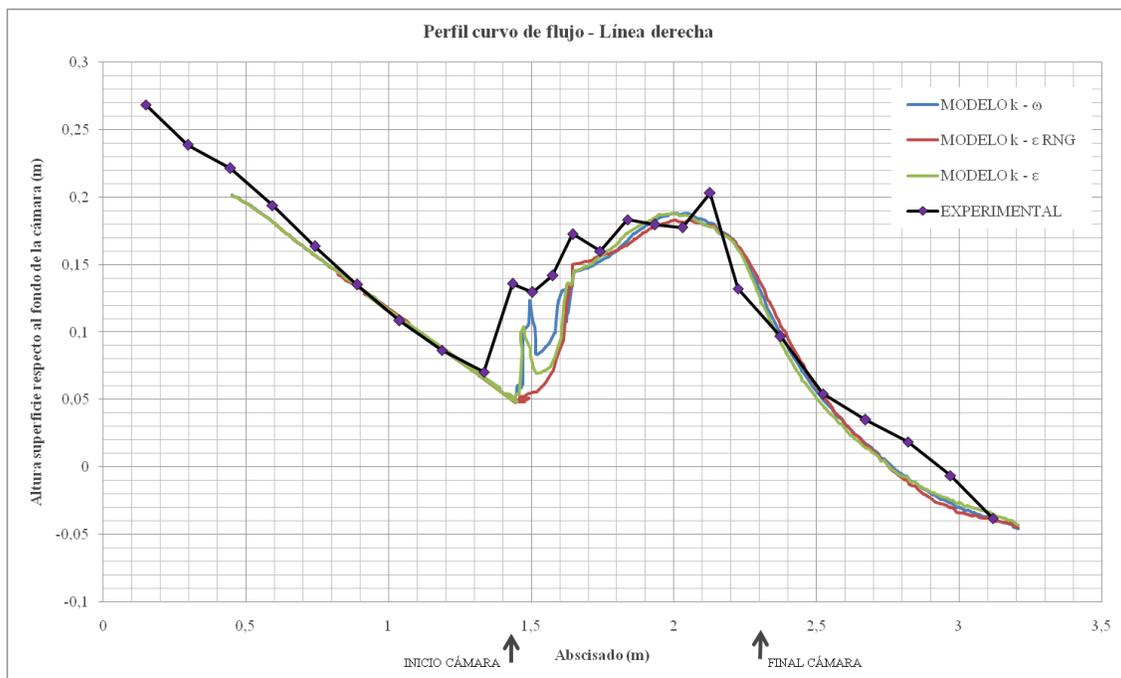
Gráfica 2: Perfil recto de flujo por la línea derecha para UF-2.



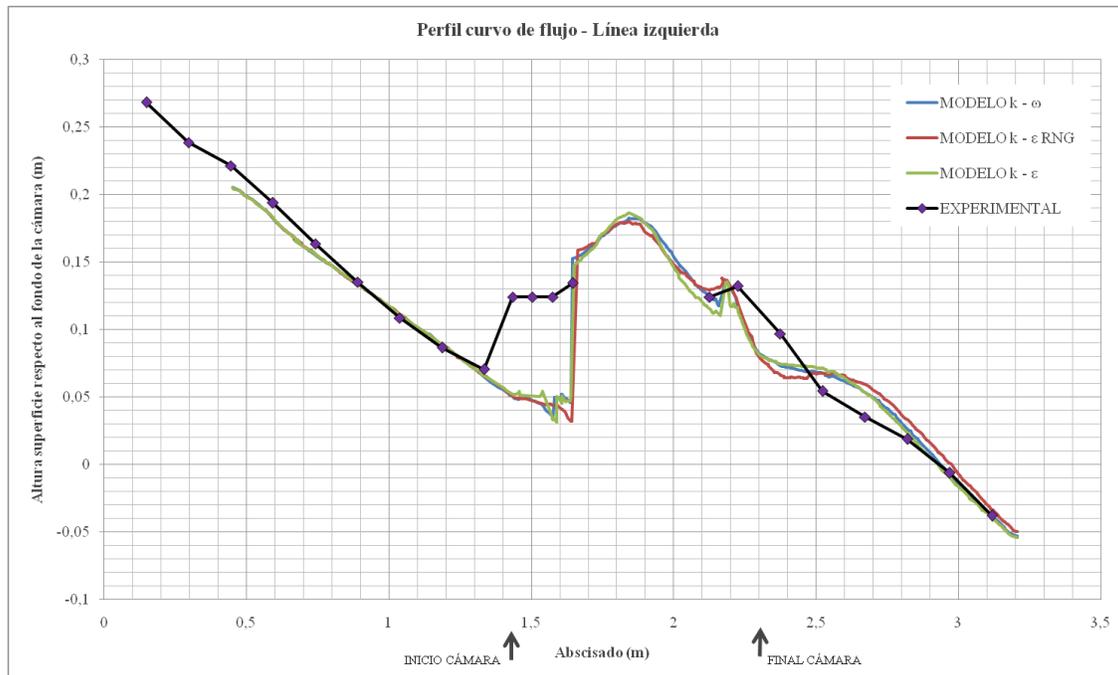
Gráfica 3: Perfil recto de flujo por la línea de flujo izquierda para UF-2.



Gráfica 4: Perfil curvo de flujo por la línea central para UF-2.



Gráfica 5: Perfil curvo de flujo por la línea derecha para UF-2.



Gráfica 6: Perfil curvo de flujo por la línea izquierda para UF-2.

Usando las gráficas anteriores se establece que el modelo computacional desarrollado predice adecuadamente los perfiles de flujo medidos por el CIACUA para UF-2. Los perfiles rectos de flujo enseñan mejor comportamiento que lo perfiles curvos de flujo, pero esto se debe al cambio brusco por la intersección entre planos de corte perpendiculares. Aunque los resultados de algunos escenarios de modelación no se acoplen adecuadamente la información experimental, el comportamiento generalizado es bastante bueno. Además es importante recordar que no se cuenta con las incertidumbres de los perfiles experimentales.

#### 4.2. Escenarios de modelación para Flujo Directo (FD) y Flujo a 90° (FN)

Los escenarios de modelación indicados por las Tablas 12 a 15 corresponden a la condición de Flujo Directo, (FD). Esto quiere decir que solo se presenta flujo de agua por la tubería de entrada principal, razón por la cual solo se presentan los perfiles de flujo en la dirección de la tubería de entrada principal. Mientras que los escenarios de modelación indicados por las Tablas 16 y 17 corresponden a la condición FN, donde solo se presenta flujo a través de la tubería de entrada lateral, de manera que solo se grafican los perfiles de flujo que inician en la tubería de entrada lateral.

Tabla 12: Condiciones de flujo para FD-3.

FD-3	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	25.51	67.21	30%	2.57	3.73	1.54E+06	Sup-Turb
	25.51	55.40	-	2.95	4.80	2.81E+06	Sup-Turb

Tabla 13: Condiciones de flujo para FD-4.

FD-4	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	47.38	96.61	43%	2.92	3.44	1.42E+06	Sup-Turb
	47.38	74.38	-	3.61	5.01	2.92E+06	Sup-Turb

Tabla 14: Condiciones de flujo para FD-6.

FD-6	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	73.84	127.59	57%	3.19	3.15	1.30E+06	Sup-Turb
	73.84	93.39	-	4.11	5.02	2.92E+06	Sup-Turb

Tabla 15: Condiciones de flujo para FD-8.

FD-8	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	52.22	92.50	41%	3.41026	4.125	1.699E+06	Sup-Turb
	52.22	58.30	-	5.62293	8.883	5.193E+06	Sup-Turb

Tabla 16: Condiciones de flujo para FN-7.

FN-7	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	50.5	143.77	64%	1.90	1.71	7.09E+05	Sup-Turb
	50.5	184.19	-	1.18	0.93	5.44E+05	Sub-Turb

Tabla 17: Condiciones de flujo para FN-8.

FN-8	Caudal [L/s]	Profundidad del flujo [mm]	Relación de llenado [%]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	No. De Reynolds	Tipo de Flujo
	40	89.06	40%	2.75	3.40	1.40E+06	Sup-Turb
	40	101.69	-	1.98	2.31	1.34E+06	Sup-Turb

A continuación se presentan los resultados de un escenario tipo para escenarios de modelación FD y FN. Estos se componen de la superficie del flujo y de los perfiles de flujo en cada uno de los planos por lo que corren los ejes de medición utilizados por el CIACUA. La única diferencia entre los resultados de un escenario FD y un escenario FN es que en el primero se enseñan perfiles rectos de flujo mientras que en el segundo se enseñan perfiles curvos de flujo.

Para el escenario de modelación FD-4, la superficie de flujo por cada modelo de turbulencia se enseña en las Figuras 23 a 25, mientras que los perfiles de flujo se muestran en las Gráficas 7 a 9.

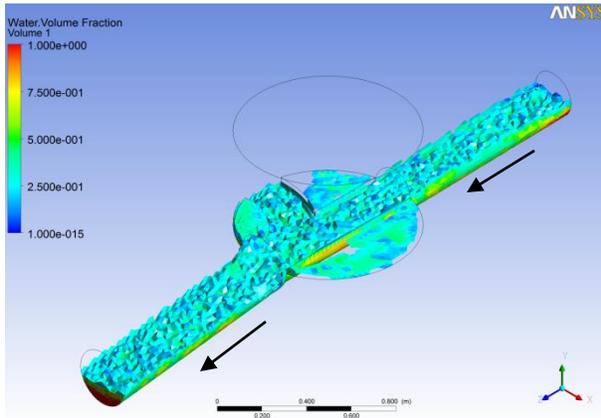


Figura 23: Superficie del flujo en FD-4. Modelo k-ε estándar.

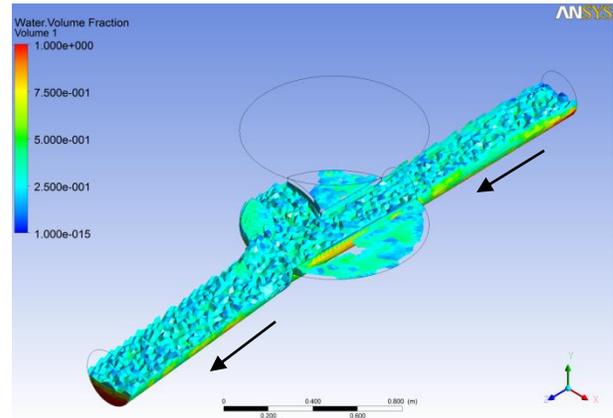


Figura 24: Superficie del flujo en UFD-4. Modelo k-ε RNG.

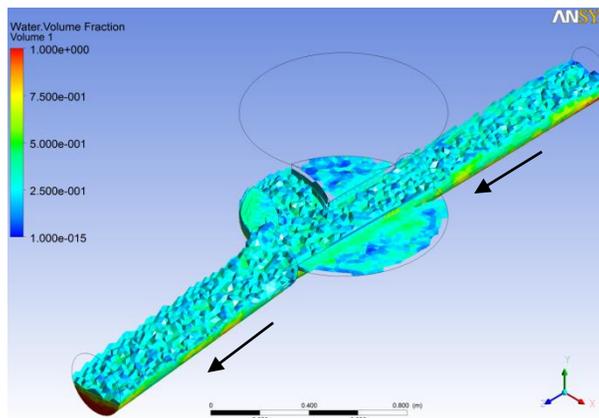
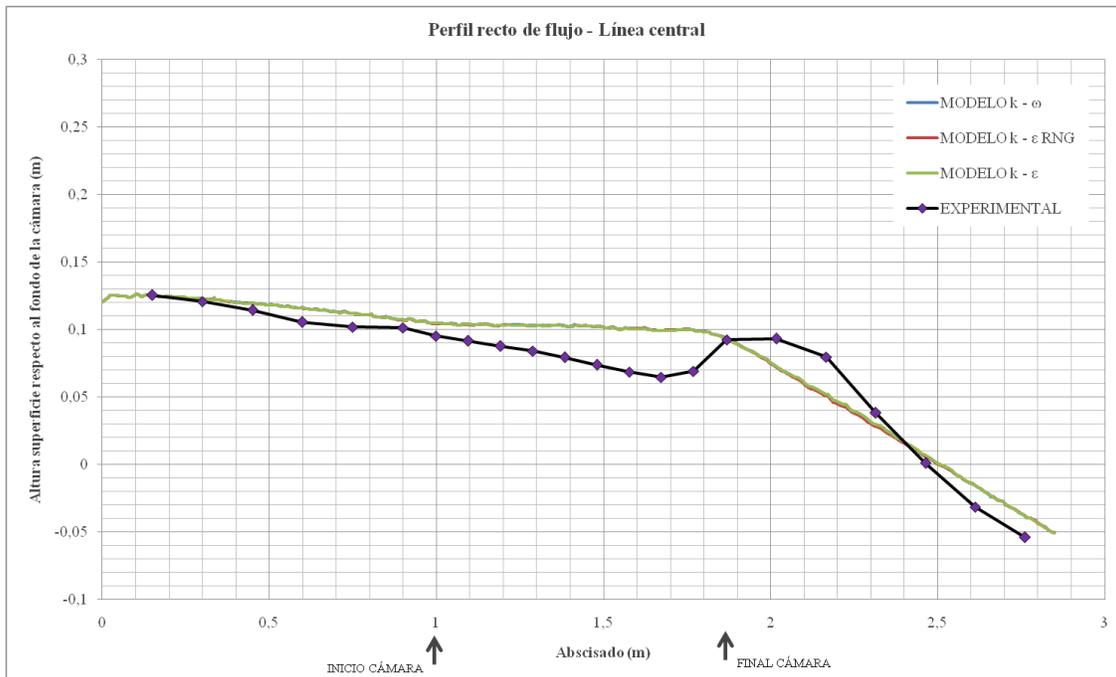
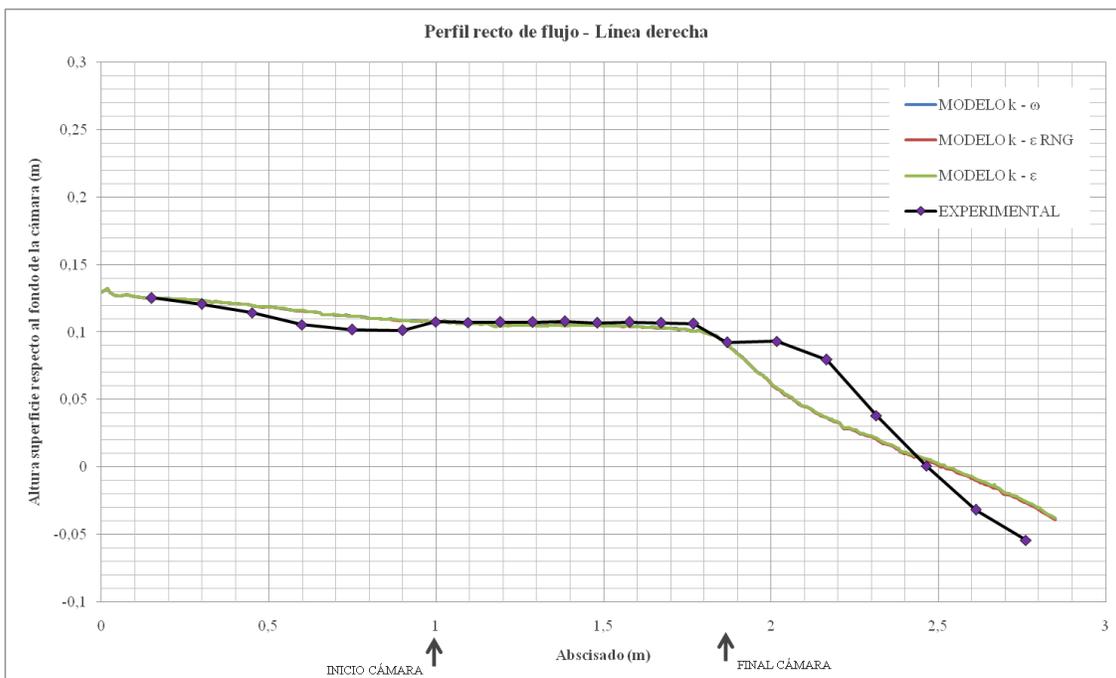


Figura 25: Superficie del flujo en FD-4. Modelo k-ω.

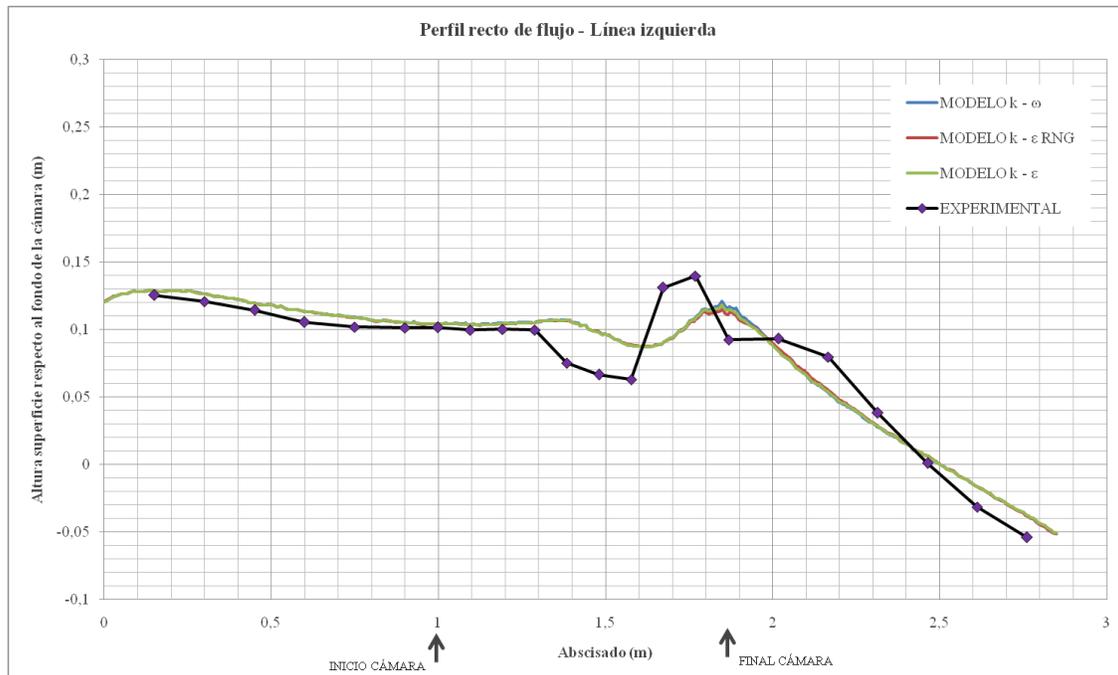
Como se observa en las Gráficas 7 a 9 y en el resto de gráficas en Anexos, los perfiles de flujo de los escenarios FD presentan un comportamiento muy similar a pesar de que los parámetros de entrada sea distintos. En general, se observa que el nivel de flujo se mantiene constante o que disminuye muy poco hasta casi el final de la cámara. A partir de este punto, el nivel cae de manera pronunciada hasta que el flujo sale por la tubería de salida.



Gráfica 7: Perfil recto de flujo por la línea central para FD-4.



Gráfica 8: Perfil recto de flujo por línea derecha para FD-4



**Gráfica 9: Perfil recto de flujo por línea izquierda para FD-4.**

En cuanto a los resultados en Anexos para los escenarios FN, se puede establecer que los modelos computacionales simulan adecuadamente el perfil de flujo en la tubería de entrada lateral y al inicio de la cámara de inspección, pero se alejan significativamente de los datos experimentales a medida que el flujo avanza hacia la tubería de salida. Este comportamiento es más marcado en el escenario FN-8 que en el escenario FN-7.

Es importante notar que en todas las figuras de perfiles de flujo se indica la ubicación sobre las abscisas del inicio y final de la cámara. Lo anterior permite establecer relaciones entre cambios relevantes en el perfil de flujo y su ubicación relativa a la cámara de inspección.

De FD-3 solo se incluyen 2 gráficas de perfiles de flujo en Anexos, para la línea central y para la línea izquierda. No se anexa gráfica de la línea derecha debido a que no se cuenta con información experimental sobre el perfil del flujo a lo largo de este plano de medición.

### 4.3. Comportamiento de los residuos de las ecuaciones fundamentales

En todas las simulaciones realizadas, el comportamiento de todos los residuos (residuos de las ecuaciones de momentum en cada dirección: azul oscuro (en X), amarillo (en Y), azul claro (en Z); residuos de las ecuaciones de continuidad de cada fase: verde (agua), rojo (aire); residuos de las ecuaciones de adicionales para modelar la turbulencia) es muy similar: Primero se observa un periodo en que los residuos disminuyen de manera asintótica desde  $1 \cdot 10^{-2}$ , aproximadamente, hasta un valor en el que desaparece la tendencia a disminuir y se estabiliza el comportamiento. A partir de este punto aparece la segunda zona que va hasta el final de la simulación, donde se observa que los residuos oscilan alrededor de un valor suficientemente pequeño (entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$ ). Aunque el análisis del flujo a través de la cámara de inspección se realiza para un sistema estabilizado, en la realidad existen variaciones latentes de las velocidades y presiones en todo el dominio, pero estas son tan pequeñas que se permiten tratar el fenómeno como flujo en estado estable. Estas variaciones son las causantes del comportamiento oscilatorio de los residuos.

A continuación se enseñan gráficas de residuos de los escenarios en que se presentaron las diferencias más marcadas entre modelos de turbulencias. En el resto de escenarios se excluyeron pues no es posible establecer diferencias relevantes.

Las primeras gráficas (Gráficas 10 a 12), son residuos de las ecuaciones de momentum y continuidad para los tres modelos de turbulencia en la simulación del escenarios FN-8. Se observa que el modelo k- $\epsilon$  estándar es más estable que los otros dos en cuanto al comportamiento de las ecuaciones de momentum, aunque los modelos RNG y k- $\omega$  resuelven las ecuaciones de continuidad con mayor precisión que el primero. El comportamiento del modelo k- $\epsilon$  RNG en relación con las ecuaciones de momentum es más estable que el del modelo k- $\omega$ .

Posteriormente (Gráficas 13 a 15), se enseñan los residuos de las ecuaciones fundamentales para cada uno de los modelos de turbulencia en el escenario de modelación FD4. El comportamiento es muy similar para todos los modelos. En general las variaciones presentadas por el modelo RNG son menores, pero los valores de los residuos de las ecuaciones de continuidad para el modelo k- $\omega$  son menores.

Y, finalmente, se enseña el comportamiento de los residuos de las ecuaciones fundamentales para el escenario de modelación FD-6. En general, para este escenario de modelación, el modelo de turbulencia k- $\omega$  se comporta mejor que los otros dos modelos. Las variaciones de los residuos son más pequeñas y oscilan alrededor de valores muchos menores.



Figura 26: Residuos para FN-8, modelo k-ε estándar.



Figura 27: Residuos para FN-8, modelo k-ε RNG.

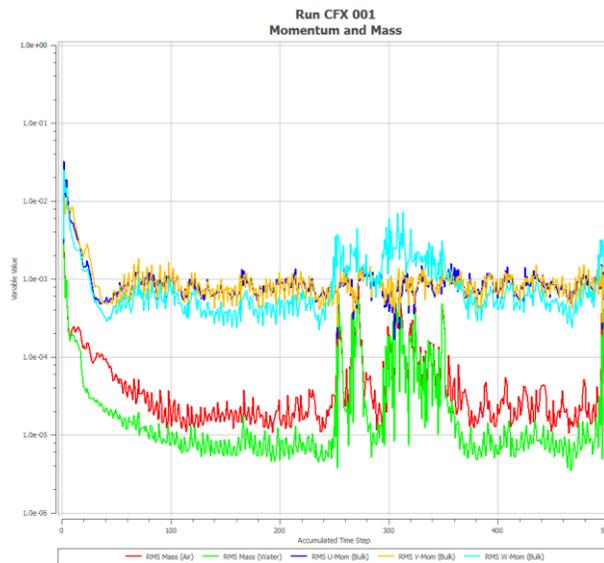


Figura 28: Residuos para FN-8, modelo k-ω.

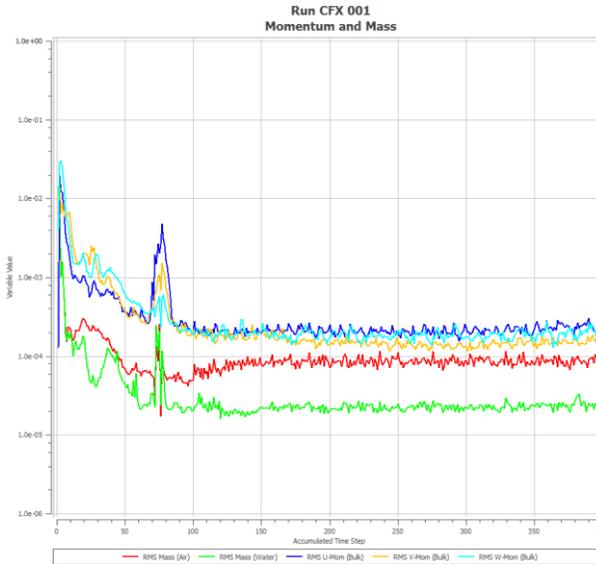


Figura 29: Residuos para FD-4, modelo k-ε estándar.

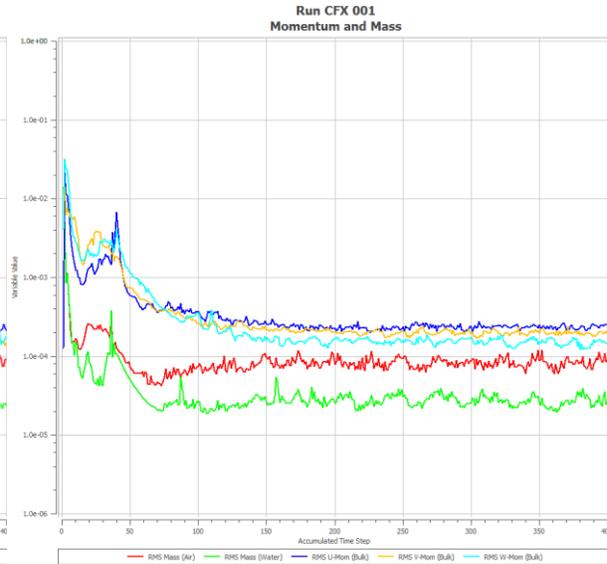


Figura 30: Residuos para FD-4, modelo k-ε RNG.

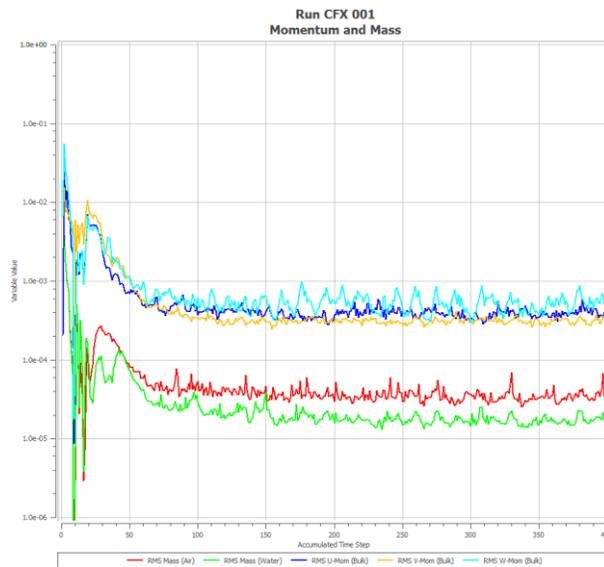


Figura 31: Residuos para FD-4, modelo k-ω.

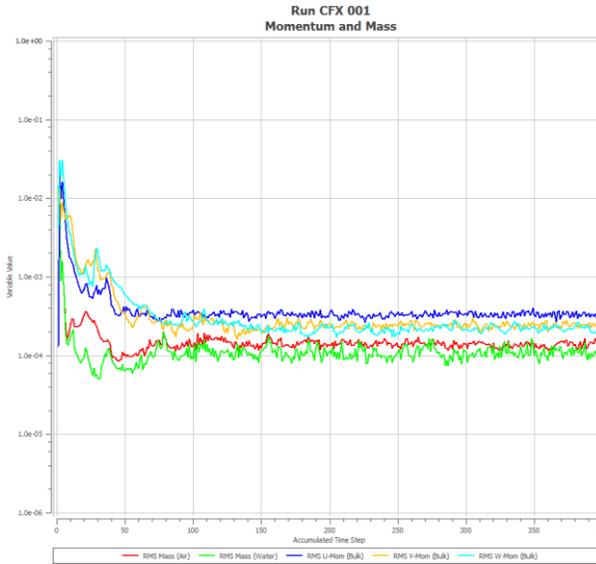


Figura 32: Residuos para FD-6, modelo k-ε estándar.

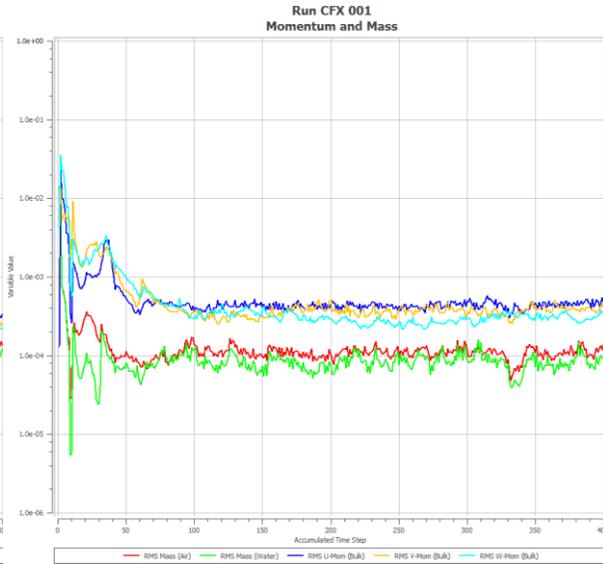


Figura 33: Residuos para FD-6, modelo k-ε RNG.

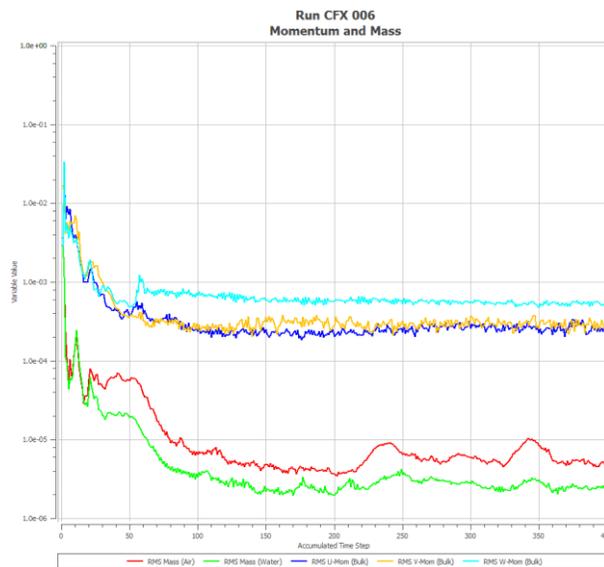


Figura 34: Residuos para FD-6, modelo k-ω.

De lo anterior es posible establecer que los residuos oscilan alrededor de valores adecuados ( $<10^{-3}$ ) por periodos prolongados; en consecuencia los modelos tratados logran estabilizarse y alcanzan resultados deseables.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. Perfiles de flujo

Según los perfiles enseñados en la sección anterior y en Anexos, las simulaciones se comportan adecuadamente y, en la mayoría de los casos, predicen los resultados medidos por el CIACUA (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010). UF-4, FN-8 y UF-5, no dan tan buenos resultados como los demás escenarios de modelación. En UF-4 se presentan variaciones significativas en la tubería de entrada principal y en la tubería de salida mientras que en UF-5 se observan variaciones significativas dentro de la cámara. También es común encontrar en los perfiles curvos de flujo (para UF-2, UF-3, UF-4, UF-5, FN-7 y FN-8) cambios bruscos en el nivel del agua a la altura de la entrada a la cámara. Esto se debe, como se mencionó anteriormente, a que este perfil de flujo está compuesto por dos planos de corte que se intersecan. Adicionalmente se observa en perfiles curvos de flujo por la línea izquierda que los datos experimentales presentan una discontinuidad a falta de puntos de medición entre 1.7 m y 2.1 m (zona al interior de la cámara). Esto puede ser un problema ya que no hay curva de referencia en esta región.

Es importante resaltar que en general se observa un pequeño retraso en los perfiles de flujo obtenidos respecto a las mediciones experimentales, pero no existe información experimental que permita establecer cuál es el rango de variación de los valores experimentales, por lo que no es posible establecer si los perfiles de los modelos computacionales están dentro de un rango adecuado, aunque si se observa buena proximidad entre los resultados de las simulaciones y los valores experimentales.

En UF-2 y UF-5 se presentan variaciones significativas en el perfil curvo de flujo a la entrada de la cámara, pero es importante resaltar nuevamente que los planos de corte ocasionan cambios bruscos en el perfil de flujo. En ambos se observan pequeños retrasos en los perfiles obtenidos de la simulación respecto a las mediciones experimentales. Se observa un aumento fuerte en el nivel de agua a la entrada de la cámara que, posteriormente, cae gradualmente, tanto en el perfil lateral (perfil curvo de flujo) como en el perfil principal (perfil recto de flujo).

Las simulaciones de UF-3 enseñan perfiles rectos de flujo que se asemejan mucho a la curva experimental. Los perfiles curvos de flujo no se enseñan en su totalidad debido a problemas de visualización de resultados. Todos los modelos predicen los mismos perfiles de flujo, sobre todo en la tubería de entrada principal y al interior de la cámara; al recorrer la tubería de salida se observa una pequeña variación en los perfiles de cada modelo de turbulencia. No se observan cambios de altura significativos en la altura de la superficie durante el recorrido.

En cuanto a UF-4, los resultados experimentales indican que ocurre un fuerte cambio de nivel del agua a la entrada de la cámara tanto sobre los perfiles principales como sobre los perfiles laterales. Los perfiles laterales se comportan adecuadamente, pero los perfiles principales son significativamente distintos a los resultados experimentales. En el interior de la cámara hay

similitud entre la experimentación y los perfiles principales, pero a lo largo de la tubería de entrada y de salida los resultados divergen en gran medida. Los resultados de las simulaciones predicen que sobre los perfiles principales debe presentarse una altura de la lámina de agua constante en la tubería de entrada. Según el estudio del CIACUA, para este escenario de flujo se presenta una sobrecarga al interior de la cámara que obliga al flujo de agua de la tubería de entrada principal a aumentar gradualmente su altura. Es posible que el dominio de la tubería de entrada sea muy corto y, en consecuencia, las simulaciones no puedan recrear el aumento de nivel progresivo debido al fenómeno de sobrecarga adecuadamente. De ser el caso sería necesario ampliar la longitud de la tubería de entrada y verificar que la simulación mejore.

Los escenarios de Flujo Directo (FD-3, FD-4, FD-6 y FD-8) muestran comportamientos similares en cuanto los perfiles de flujo obtenidos de las simulaciones. Las simulaciones del escenario FD-4 enseñan mejor comportamiento que las simulaciones realizadas para los otros escenarios FD, pero se observa un pequeño retraso respecto a la curva experimental. En cuanto a FD-3, las simulaciones predicen el aumento pronunciado de nivel que ocurre hacia el final de la cámara pero se presenta un sesgo importante en relación al valor máximo de nivel de agua medido experimentalmente. Esto puede deberse a un error en las mediciones experimentales de este punto, pues la diferencia en alturas entre este punto y los puntos vecinos es muy grande.

FN-8 y FN-7 son los únicos escenarios de modelación para Flujo a 90°, lo que puede ser poco apropiado ya que no suministran información suficiente sobre el comportamiento de las simulaciones para escenarios de Flujo a 90°. En ambos casos se predicen adecuadamente los niveles de agua en la tubería de entrada lateral y al inicio de la cámara. Las predicciones para FN-7 presentan menos diferencias con la curva experimental al interior de la cámara y a lo largo de la tubería de salida que las predicciones para FN-8. En FN-8 los perfiles sobre la línea central caen repentinamente hacia el final de la cámara y se alejan sustancialmente de la curva experimental y los perfiles sobre la línea derecha indican retraso respecto a los datos experimentales y niveles de superficie mayores a los medidos.

La malla es gruesa y a falta de resolución se pueden estar omitiendo mejores resultados en los perfiles de flujo, entre otras cosas. Pero de las imágenes recolectadas se pueden ver fenómenos que se describen en el informe experimental, como la formación de ondas o la elevación de la superficie. De hecho existe una tendencia al resalto o formación de una onda estacionaria para escenarios UF y FN en la zona indicada en la Figura 36. Según CIACUA, este tipo de onda se denomina onda C (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

Del informe se extrae que para relaciones de llenado y velocidades altas en la tubería lateral (conducto hidráulicamente dominante) se presenta formación de la onda C, que se ocasiona por el choque de flujo en la tubería lateral contra la pared de la cañuela. A continuación se presenta este fenómeno en el escenario de simulación UF-2.

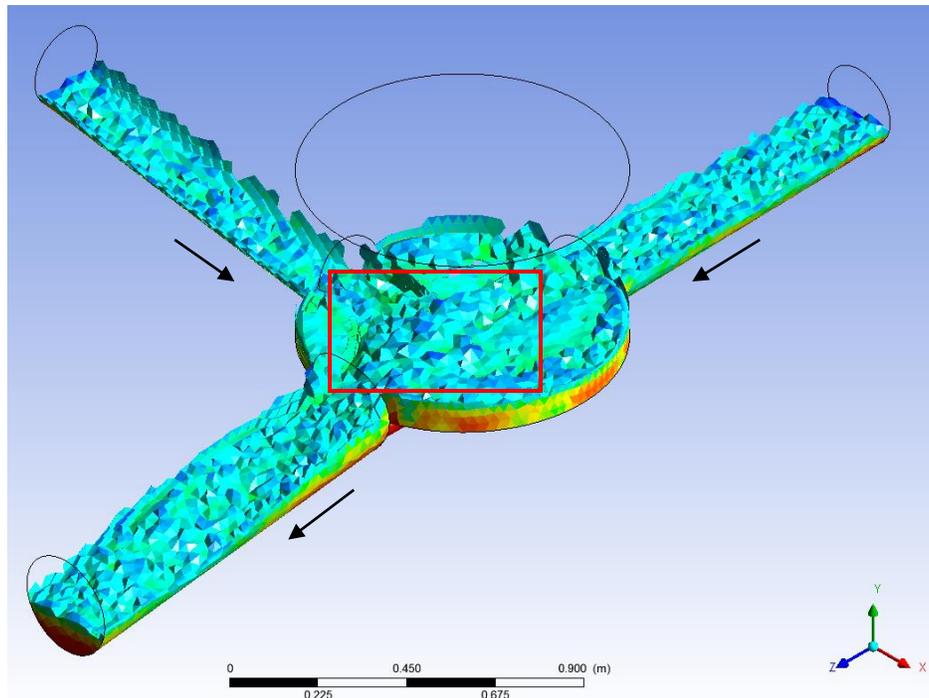


Figura 35: Formación de onda C en UF-2. Modelo k- $\omega$  de turbulencia.



Foto 1: Formación de una Onda C en el punto de confluencia de los flujos, para el escenario UF-2. Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

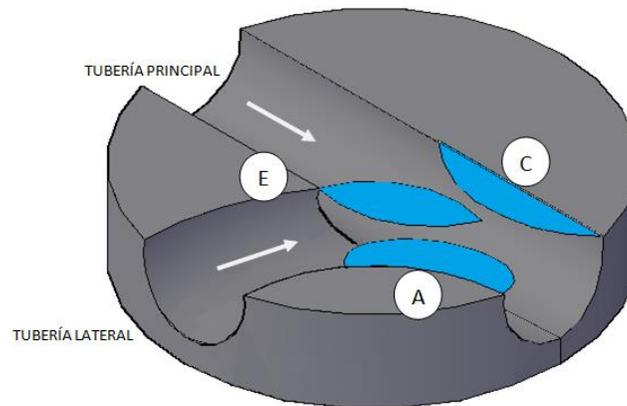


Figura 36: Zonas de formación de ondas estacionarias. Tomado de la ref. (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

Usando la Figura 35 y la Foto 1, extraídas del informe del CIACUA, es posible concluir que los perfiles apuntan a que las simulaciones funcionan adecuadamente, a pesar del tamaño de la malla. Aunque en varios casos se observan variaciones en relación a la experimentación, la mayoría de diferencias son pequeñas y los perfiles muestran los resaltos, elevaciones y caídas esperadas.

## 5.2. Fenómeno de recirculación

Según el CIACUA existe la formación de zonas de recirculación debido a que:

*"El comportamiento del flujo en una cámara de alcantarillado con flujo supercrítico está descrito por dos zonas; una zona de ondas aguas abajo del punto de unión entre los canales de conducción de la cañuela y una zona no perturbada o sin presencia de ondas aguas arriba del mismo punto, en donde el agua se almacena o represa y para grandes caudales forma un movimiento de vórtice, el flujo sobrepasa el canal de conducción o banca formando una recirculación del flujo en esta zona"* (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

Por lo que debería observarse este tipo de fenómeno en los resultados de las simulaciones. Al generar un plano de corte paralelo al fondo y ubicado cerca al fondo de la tubería y dibujar vectores de velocidad sobre este plano se observan los siguientes comportamientos.

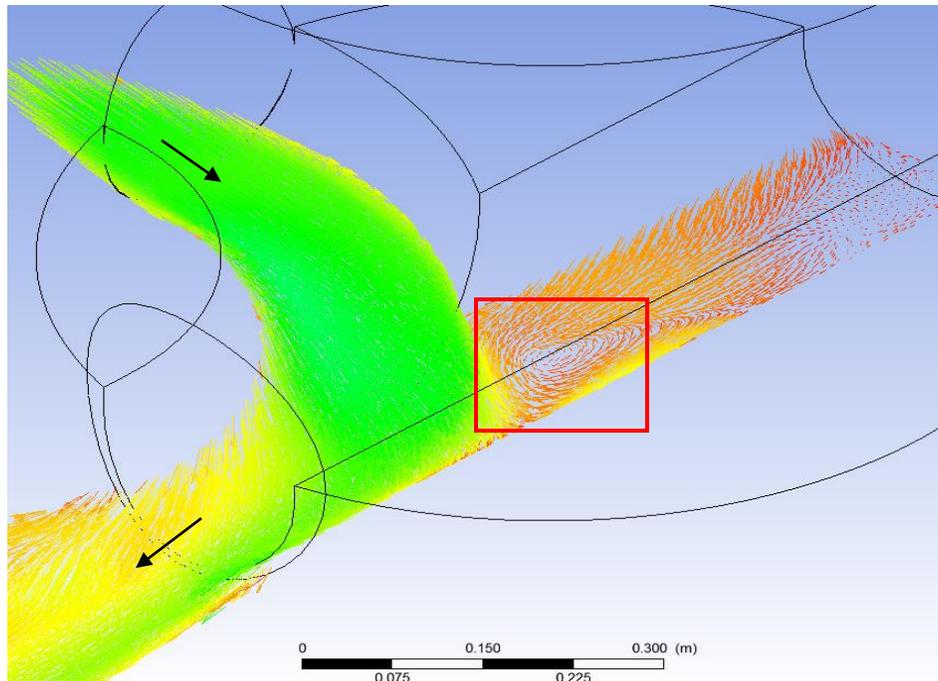


Figura 37: Vórtices i recirculación en escenario FN-7.

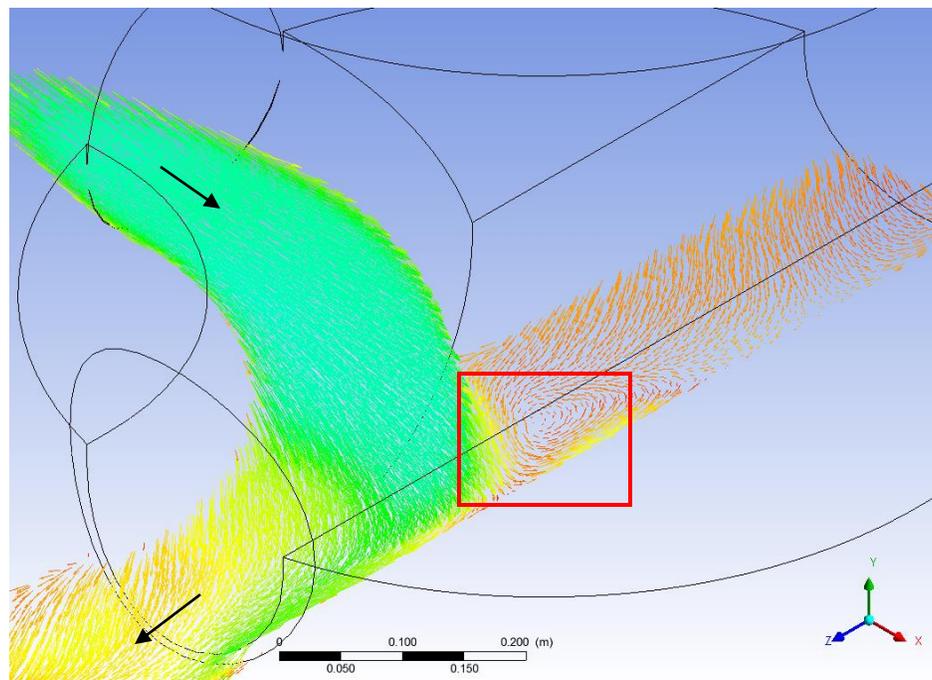


Figura 38: Vórtices o recirculación en escenario FN-8.

En estos escenarios es claro el fenómeno de recirculación documentado por CIACUA en escenarios de Flujo a  $90^\circ$ . Se observa un flujo continuo por la tubería de entrada lateral y, aguas arriba de la conexión entre las tuberías de entrada, se observa una zona de almacenamiento o represamiento que genera los vórtices y se denomina zona de recirculación.

Los escenarios de Flujo Directo a continuación indican también zonas de recirculación, como era esperado. Se presenta un flujo continuo a través de la tubería de entrada principal y en la zona de la cañuela, aguas arriba de la conexión; por la tubería de entrada lateral, se presenta represamiento de flujo y generación de vórtices. Este fenómeno se presenta en ambas figuras a continuación y corrobora los fenómenos observados por el CIACUA:

*"El comportamiento del flujo supercrítico en una cámara de inspección con entrada únicamente por la tubería principal se caracteriza por seguir su trayectoria recta, sin tener mayor efecto en el canal de conducción lateral de la cañuela. Aunque en este canal se observa un almacenamiento de agua con movimiento en forma de vórtice, [...] este almacenamiento es mínimo en comparación al caudal total que circula por el canal principal." (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).*

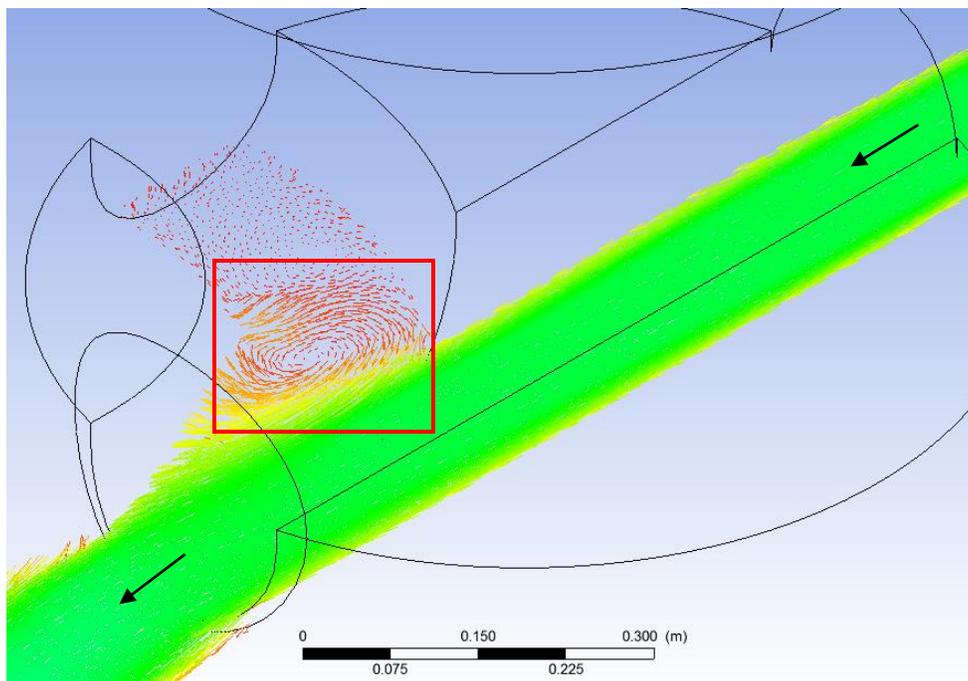


Figura 39: Vórtices o recirculación en escenario FD-3.

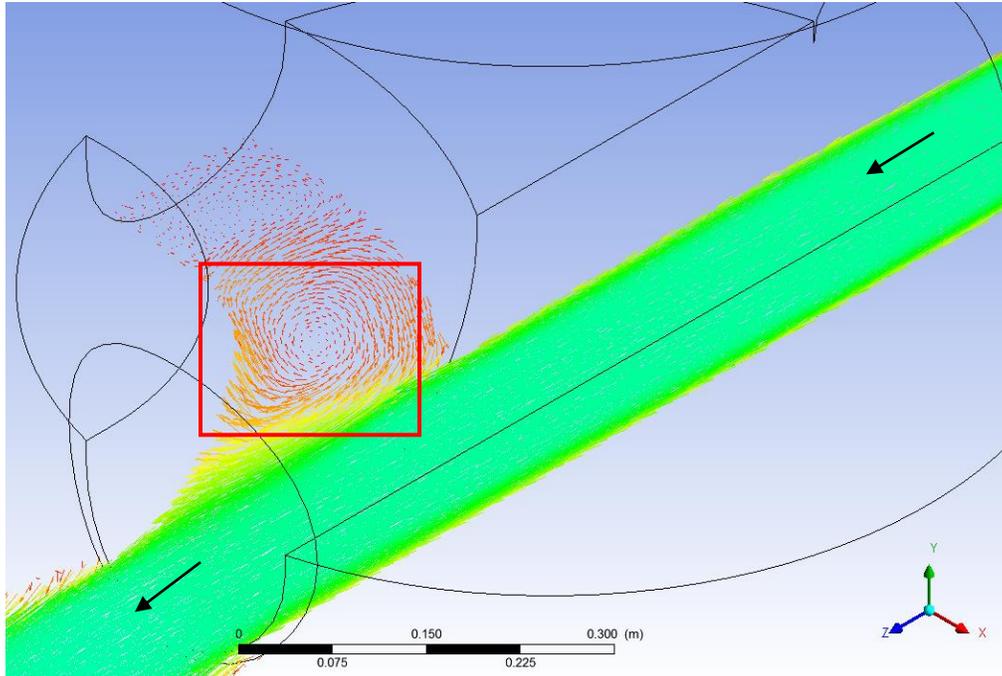


Figura 40: Vórtices o recirculación en escenario FD-4.

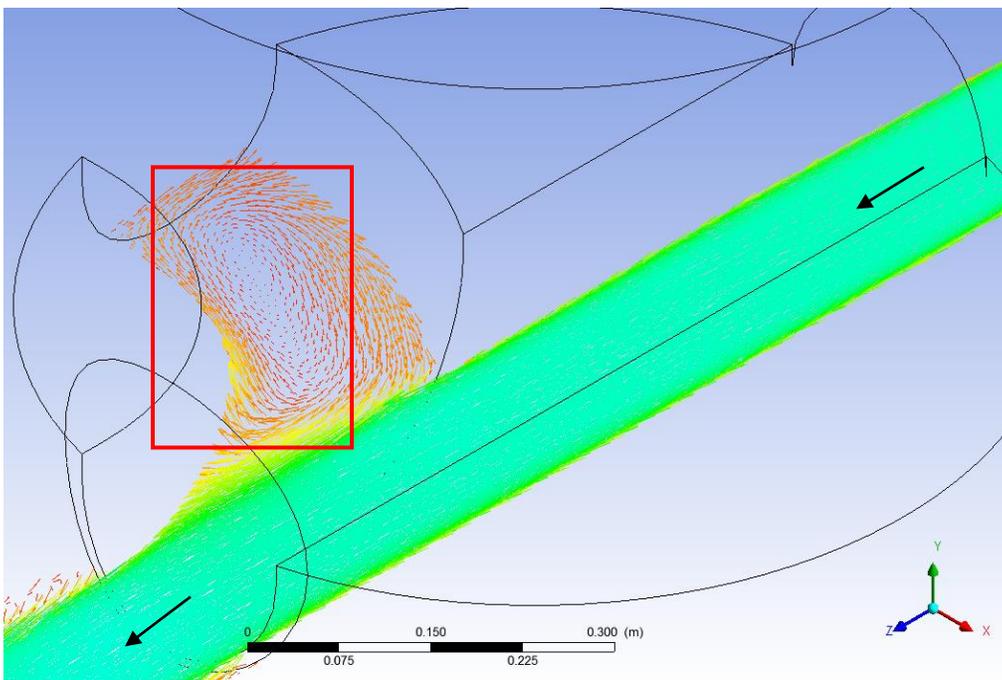


Figura 41: Vórtices o recirculación en escenario FD-6.

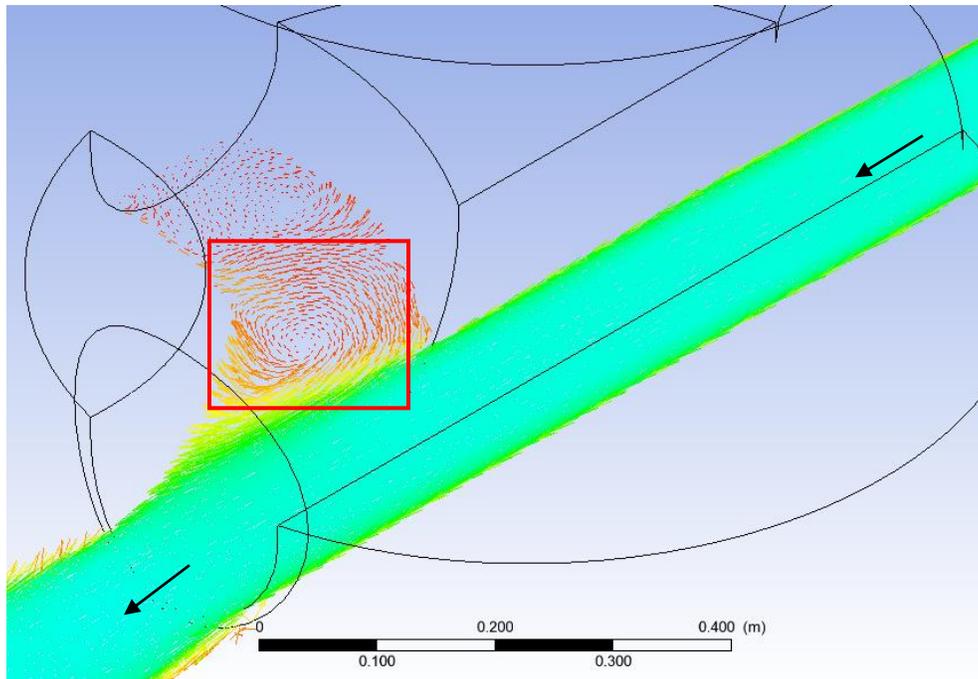


Figura 42: Vórtices o recirculación en escenario FD-8.

Se realizó el mismo estudio para escenarios de Unión de Flujos. Aunque el CIACUA no reporta formación de zonas de recirculación en la superficie, se obtuvieron los siguientes resultados. UF-2 y UF-3 indican recirculación aguas arriba de la conexión por la tubería de entrada lateral, mientras que UF-4 muestra una leve recirculación en la llegada de la tubería principal a la conexión.

En UF-3 y UF-2, el ducto dominante es el principal y, en el caso de UF-3, la velocidad del agua en la tubería lateral es el 10%, aproximadamente, de la velocidad del agua en la tubería principal, por lo que se observa un fenómeno similar al descrito para escenario de flujo directo. En UF-4 y UF-5, el conducto dominante es el lateral y la velocidad a través de este es aproximadamente 3 veces mayor a la velocidad por la tubería principal. El fenómeno de recirculación se presenta en la misma zona que para los escenarios FN, aunque la recirculación no es tan clara. Puede que estas zonas de recirculación no se observen a simple vista sobre la superficie, como si sucede en escenarios de Flujo Directo o Flujo a 90°, pero puede que el fenómeno si esté presente debido a que la velocidad y caudal del flujo a través de la tubería dominante es mucho mayor en 3 de 4 casos.

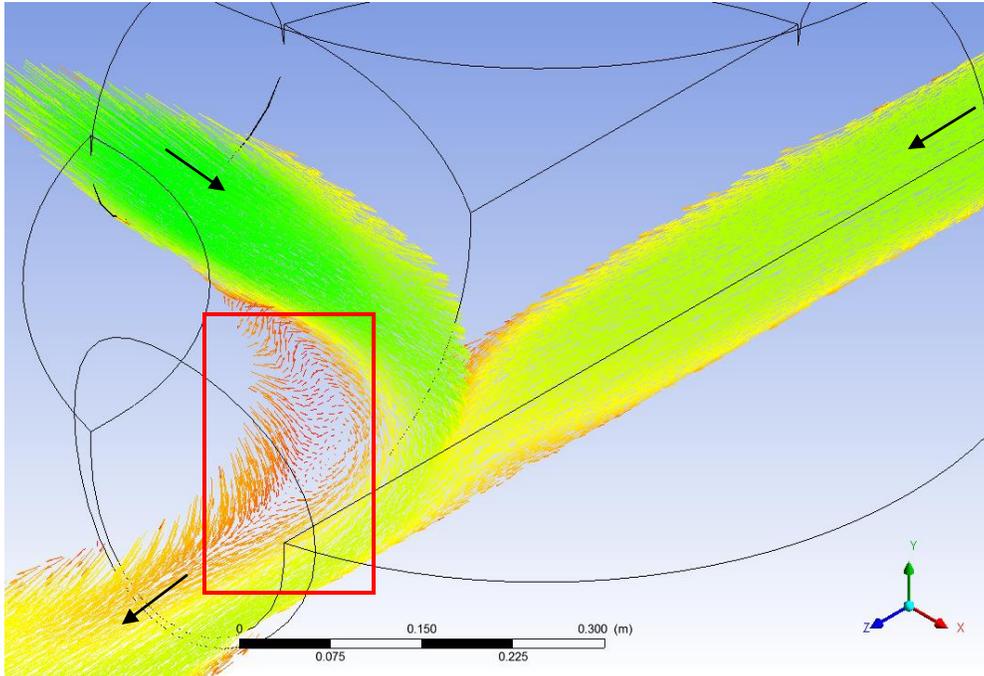


Figura 43: Vórtices o recirculación en escenario UF-2.

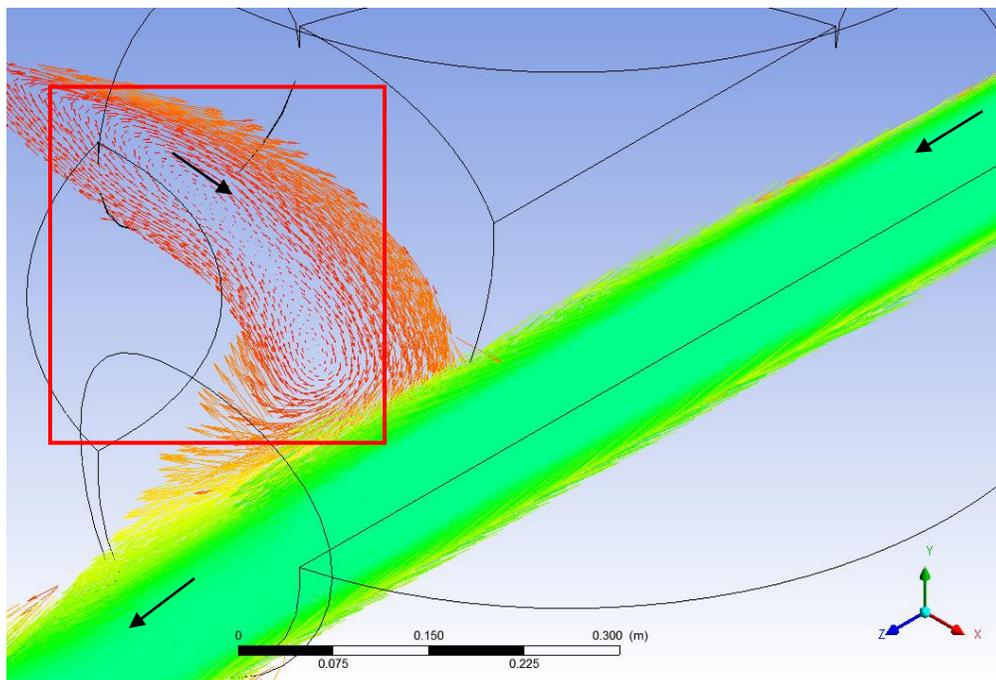


Figura 44: Vórtices o recirculación en escenario UF-3.

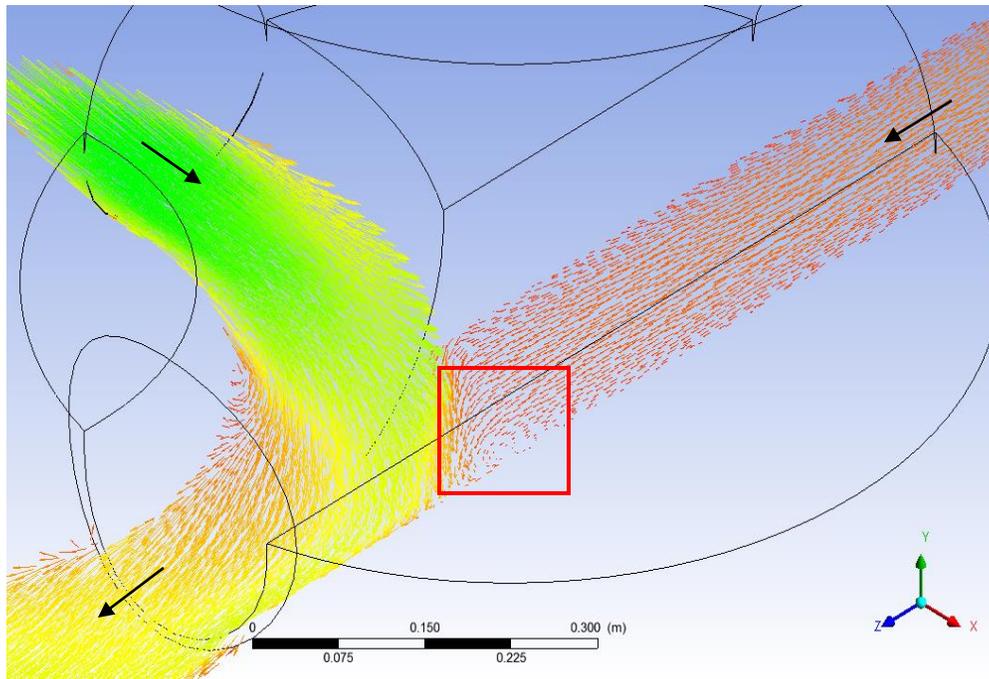
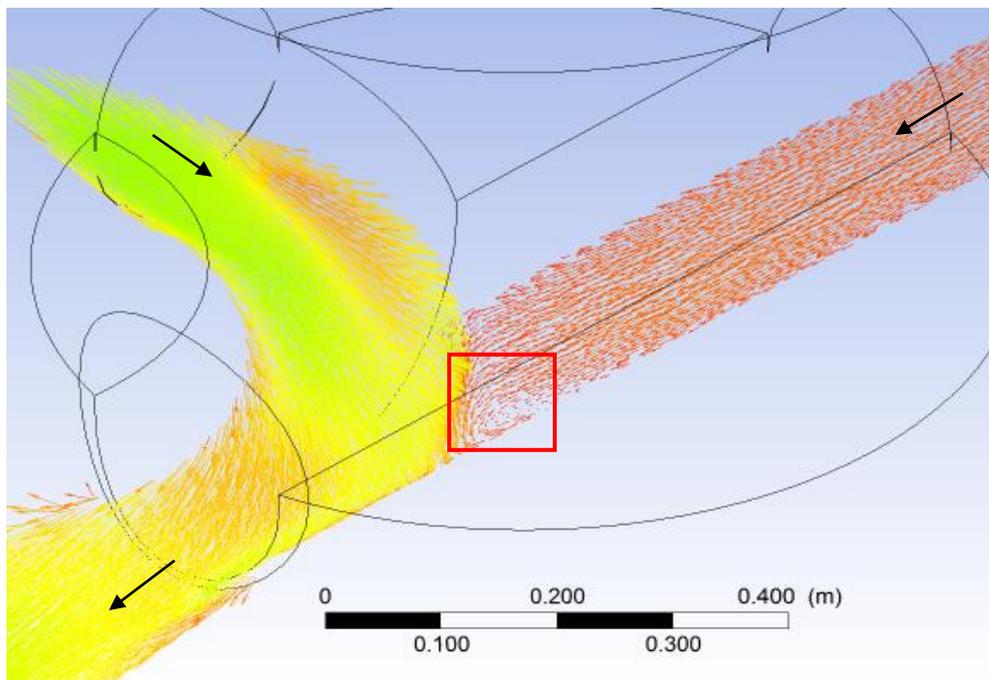


Figura 45: Vórtices o recirculación en escenario UF-4.



Según el reporte del CIACUA, los patrones de Ondas A, C y E que se observan en Figura 36, se deben a:

*" [...] choque del flujo de entrada por la tubería principal con el final de la pared interna del canal de conducción lateral de la cañuela; comportamiento típico de la onda hidráulicamente dominante de un flujo directo (**Onda A**). [...] choque del flujo de entrada por la tubería lateral con la pared del canal de conducción principal de la cañuela, comportamiento típico de la onda hidráulicamente dominante de un flujo a 90° (**Onda C**). [...] la onda, definida como **Onda E** se forma debido a la unión de los flujos en el punto de confluencia de los canales de conducción principal y lateral."*

No existe un estudio detallado sobre la relación entre este tipo de ondas y la turbulencia, pero puede que las zonas de recirculación estén relacionadas con la formación de ondas estacionarias, en especial las Ondas A, ya que la ubicación aparente es arriba de la zona de recirculación observada en los escenarios UF-2 y UF-3. El mismo informe del CIACUA establece que existe la formación de una Onda A para el escenario de flujo UF-3, lo que puede corroborar la suposición, pero se requiere de un estudio formal para poder arrojar conclusiones al respecto.

### 5.3. Tiempos de simulación

Los tiempos físicos que se enseñan en la Tabla 6 se seleccionaron a fin de permitir que el flujo dentro de la cámara se estabilizara. Entonces, si la velocidad mínima a simular es de 0.26 m/s (escenario UF-3) y se supone que la longitud máxima dentro del dominio que puede recorrer la partícula es de 3.5 m, el paso de tiempo máximo debe ser de 0.9 segundos. De manera que, inicialmente, se utilizaron pasos de tiempo menores para asegurar precisión. Entonces, para los escenarios de Unión de flujos (UF), debido a que modelar convergencia de flujos puede ser complicado se utilizó un paso de tiempo de 0.2 segundos ( $\Delta t = 0.2 \text{ s}$ ) y 1500 iteraciones para un tiempo físico de modelación de 5 minutos. Posteriormente, se aumentó el paso de tiempo para los escenarios de Flujo directo (FD) y Flujo a 90° (FN); se modelaron con  $\Delta t = 0.6 \text{ s}$  y 400 iteraciones para asegurar un tiempo físico de modelación de 4 minutos. Como lo demuestran los resultados, estos parámetros de entrada son suficientes para asegurar que el escenario de modelación alcanzara estabilidad. Dado que los resultados obtenidos en los escenarios FD y FN son, en general, buenos, lo anterior establece que es posible aumentar el paso de tiempo para los escenarios de UF. De manera que se reduzca sustancialmente el número de iteraciones necesarias para lograr la estabilidad del sistema, reduciendo en tiempo de simulación y en recursos computacionales.

En general los tiempos de simulación requeridos por cada modelo son muy similares. La diferencia máxima es de 18.6 minutos entre el modelo k- $\epsilon$  estándar y el modelo k- $\omega$  para el escenario UF-2, equivalente al 3.7% del tiempo promedio de simulación del escenario UF-2 (el tiempo promedio de simulación es de 8.213 horas). En consecuencia las diferencias en tiempo de simulación son muy pequeñas.

## 6. CONCLUSIONES

De los resultados observados no fue posible establecer un parámetro cualitativo o cuantitativo que permitiera determinar qué modelo de turbulencia se comporta mejor y es más adecuado para modelar cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico. En todas las aproximaciones realizadas para evaluar el desempeño de los modelos de turbulencia utilizados se observaron situaciones en que el modelo k- $\epsilon$  estándar presentaba mejor desempeño que los otros dos, o que el modelo k- $\epsilon$  RNG presentaba mejor desempeño, o que el modelo k- $\omega$  presentaba mejor desempeño, pero no fue posible establecer un desempeño persistentemente superior para alguno de los modelos. Es necesario entonces utilizar mejores modelos de turbulencia, como el de Esfuerzos de Reynolds (RSM), que puede mejorar las predicciones por ser un modelo más completo.

A pesar de que el análisis sea mayoritariamente cualitativo, es posible concluir que el comportamiento de los modelos de turbulencia y los resultados obtenidos de las simulaciones son buenos. La malla con que se cuenta tiene un tamaño de elementos relativamente grande que no permite tener un número suficiente de puntos dentro de la capa límite turbulenta y los tres modelos de turbulencia no difieren significativamente en ninguno de los parámetros evaluados, pero para la mayoría de los escenarios se observaron perfiles de flujo muy similares a las curvas experimentales.

Aunque no se hayan logrado resultados de gran precisión, las simulaciones desarrolladas y analizadas permiten al usuario predecir características muy relevantes para el análisis y diseño de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico, tales como una forma aproximada de los perfiles de flujo esperados, aumentos pronunciados en los niveles de agua (resaltos hidráulicos y ondas estacionarias) y fenómenos como la recirculación.

De los tiempo de simulación que se analizaron es posible concluir que los recursos computacionales necesarios para llevar a cabo las simulaciones realizadas son relativamente pocos, en especial para los escenarios FD y FN. Pero si se realiza un enmallado de mayor resolución y se utilizan pasos de tiempo muy pequeños para asegurar precisión en los resultados, los recursos aumentarán significativamente. Aun así, es importante notar que el estudio realizado a partir de la modelación numérica redujo los recursos humanos, temporales y técnicos sustancialmente.

Aunque no se enseñó ninguna escenario simulado sin el uso de modelos de turbulencia, es evidente que el fenómeno de la turbulencia es fundamental en el desarrollo del flujo supercrítico a través de cámaras de inspección. Algunos ejemplos claros de los efectos de la turbulencia son las zonas de recirculación y los cambios bruscos en el nivel de la superficie. Por esta razón es fundamental utilizar modelos de turbulencia que permitan simular adecuadamente este fenómeno, en especial en regiones cercanas a la pared.

Se recomienda seguir realizando simulaciones de los diferentes escenarios de estudio que propone el informe del comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico, a fin de contar con mayor información sobre el comportamiento de la simulación de



Flujo a 90° (FN) y flujo con caídas en las tuberías de entrada, el cual no fue estudiado en este proyecto. Si se cuenta con mayor cantidad de escenarios simulados, es posible concluir con mayor certeza sobre la validez de esta aproximación al estudio de cámaras supercríticas.

Nuevamente, es importante resaltar que no se tiene conocimiento de la incertidumbre de las variables experimentales y que puede que en la realidad los rangos de variación sean suficientemente amplios para que todos los resultados obtenidos sean satisfactorios. De manera que se recomienda tener en cuenta desarrollar mediciones experimentales que contemplen la incertidumbre para investigaciones experimentales posteriores.

Finalmente, el estudio de sistemas de flujo a través de métodos numéricos es cada vez más común, ya que si se manejan estas herramientas adecuadamente los resultados obtenidos pueden ser excelentes. De los resultados obtenidos en este estudio es posible establecer que el estudio del comportamiento hidráulico de cámaras de inspección o de sistemas de flujo similares a través de métodos numéricos puede ser muy útil para los procesos de estudio y diseño de estos elementos hidráulicos y para el análisis de problemas de superficie libre.

## 7. ANEXOS

### 7.1. Escenario de modelación UF-2

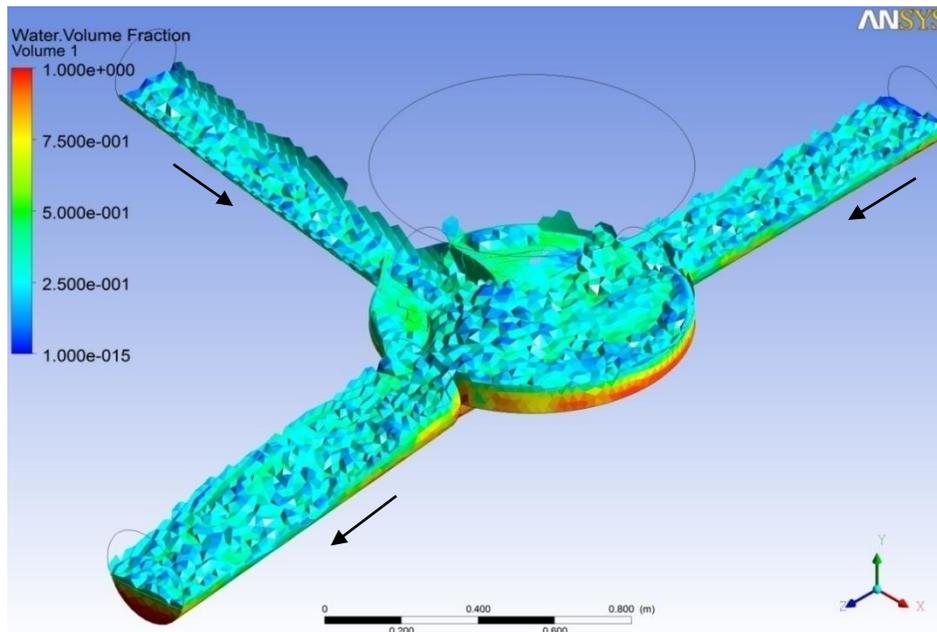


Figura anexa 1: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k-ε estándar.

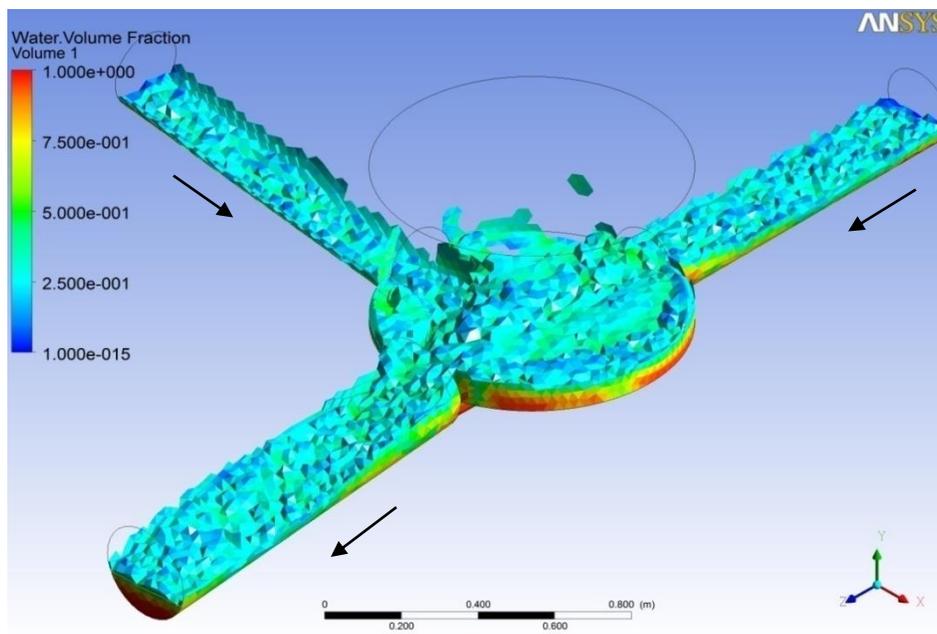


Figura anexa 2: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k-ε RNG.

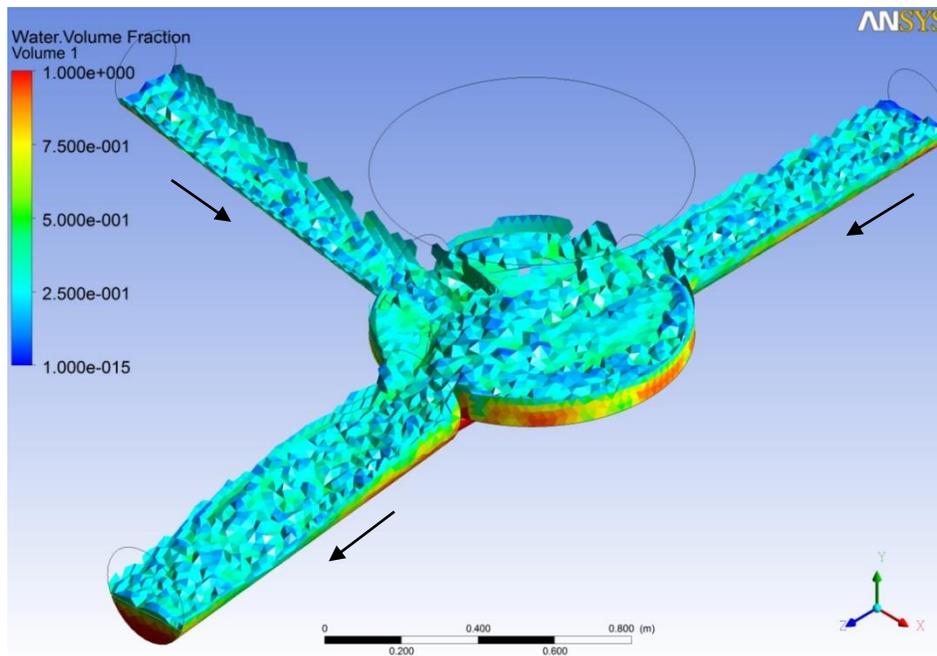


Figura anexa 3: Superficie del flujo en UF-2. Modelo k- $\omega$ .

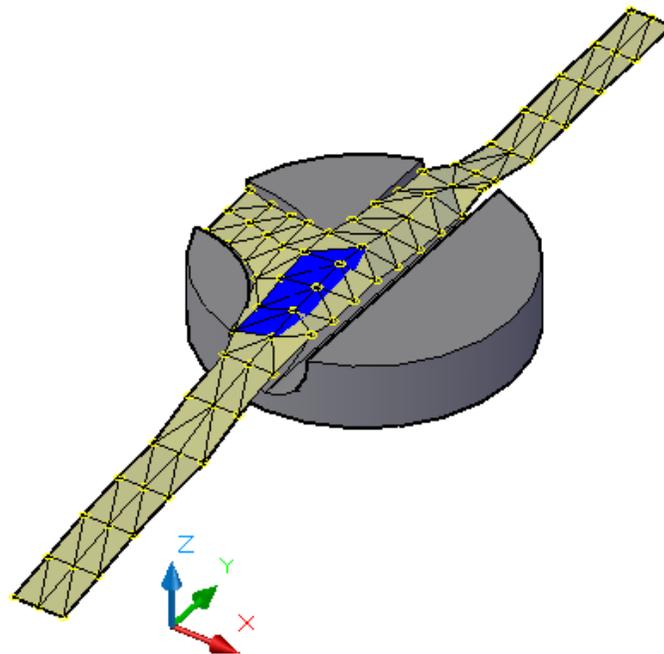
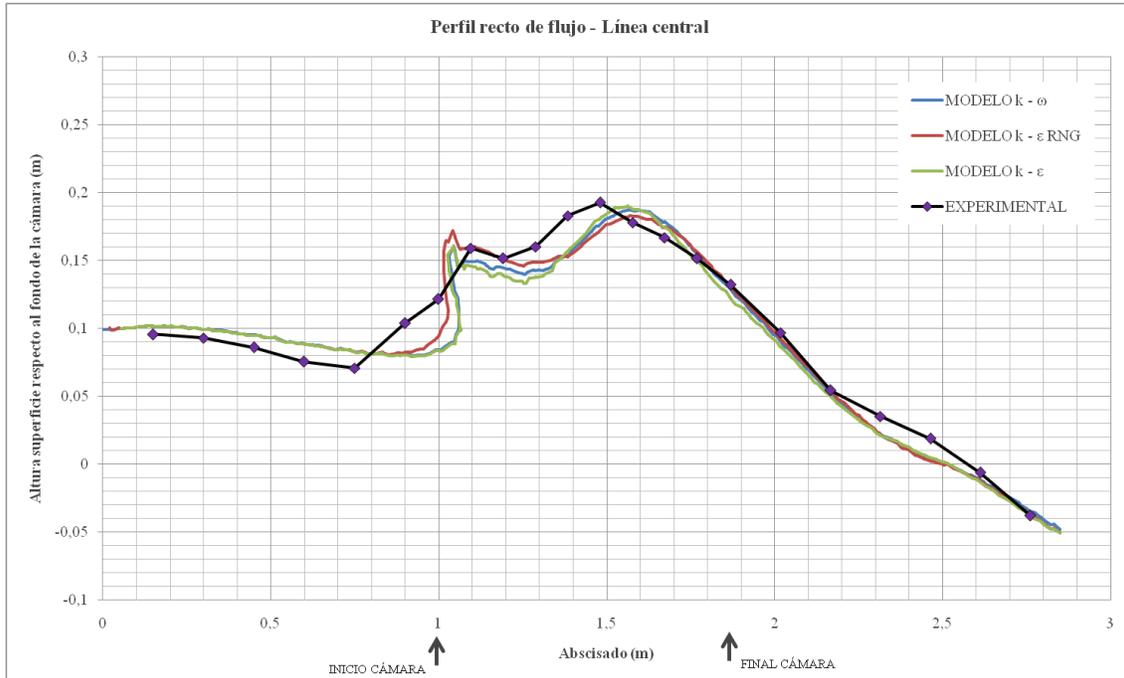
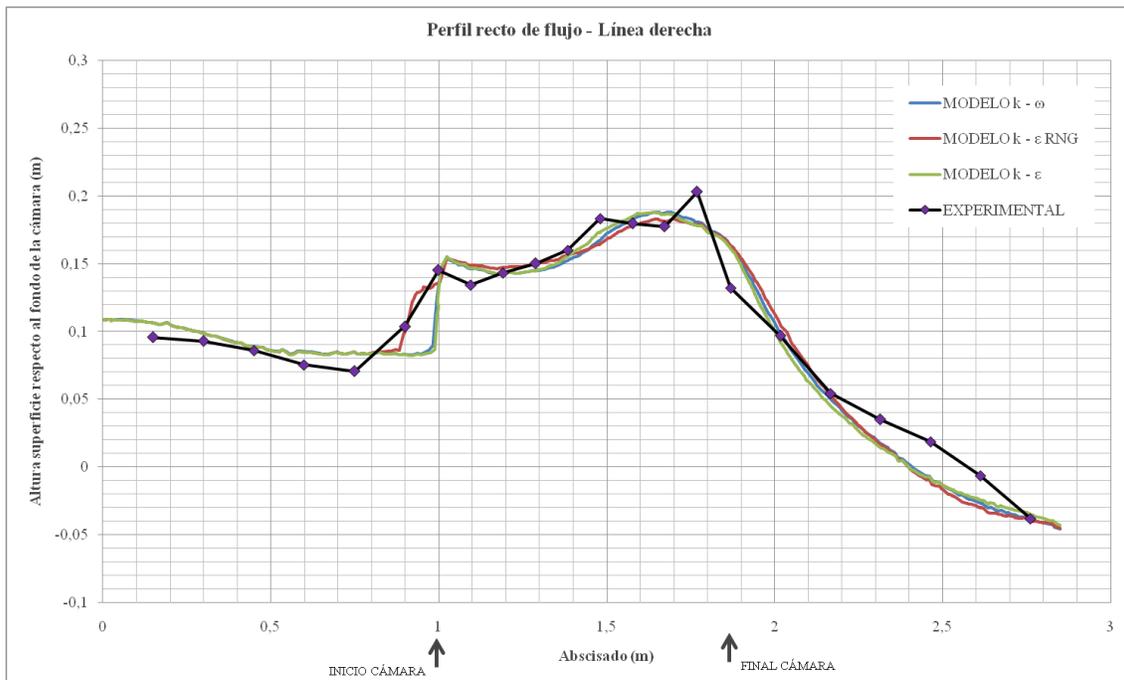


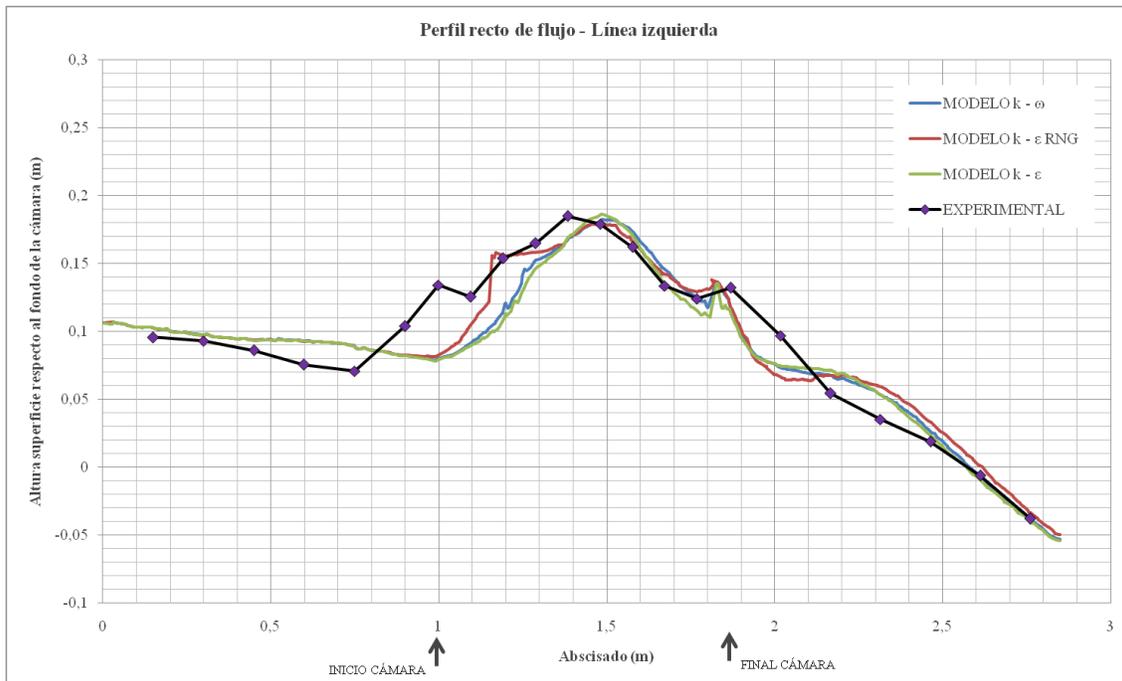
Figura anexa 4: Patrón de flujo tridimensional para UF-2. Tomado de (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).



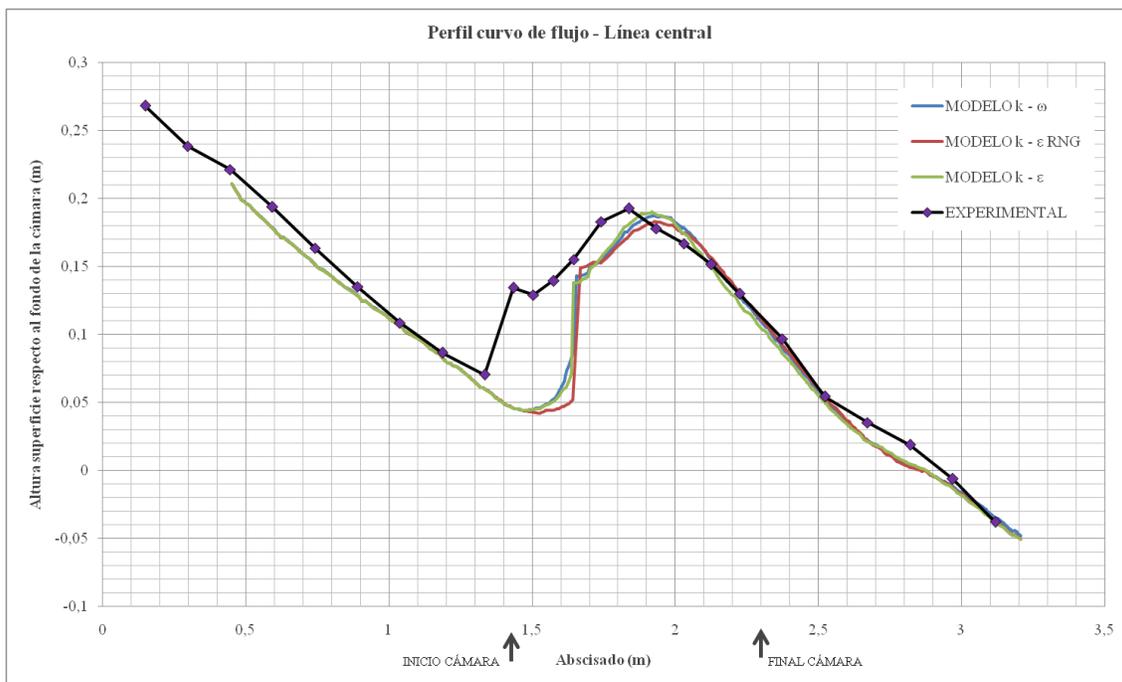
Gráfica anexa 1: Perfil recto de flujo por línea central para UF-2.



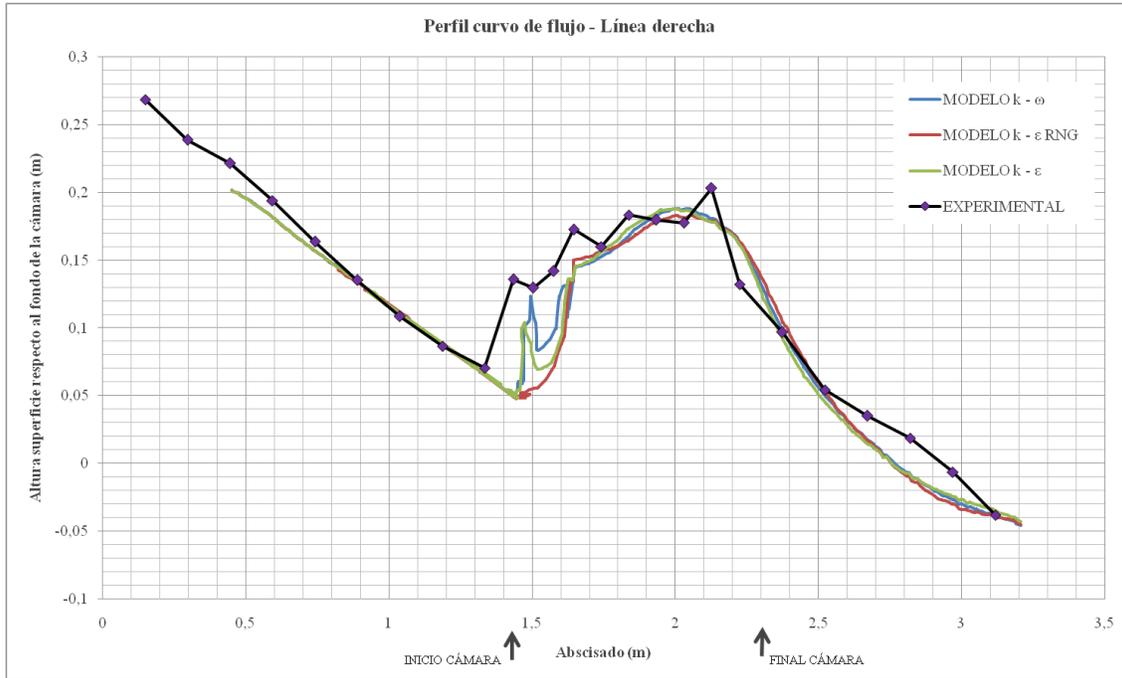
Gráfica anexa 2: Perfil recto de flujo por línea derecha para UF-2.



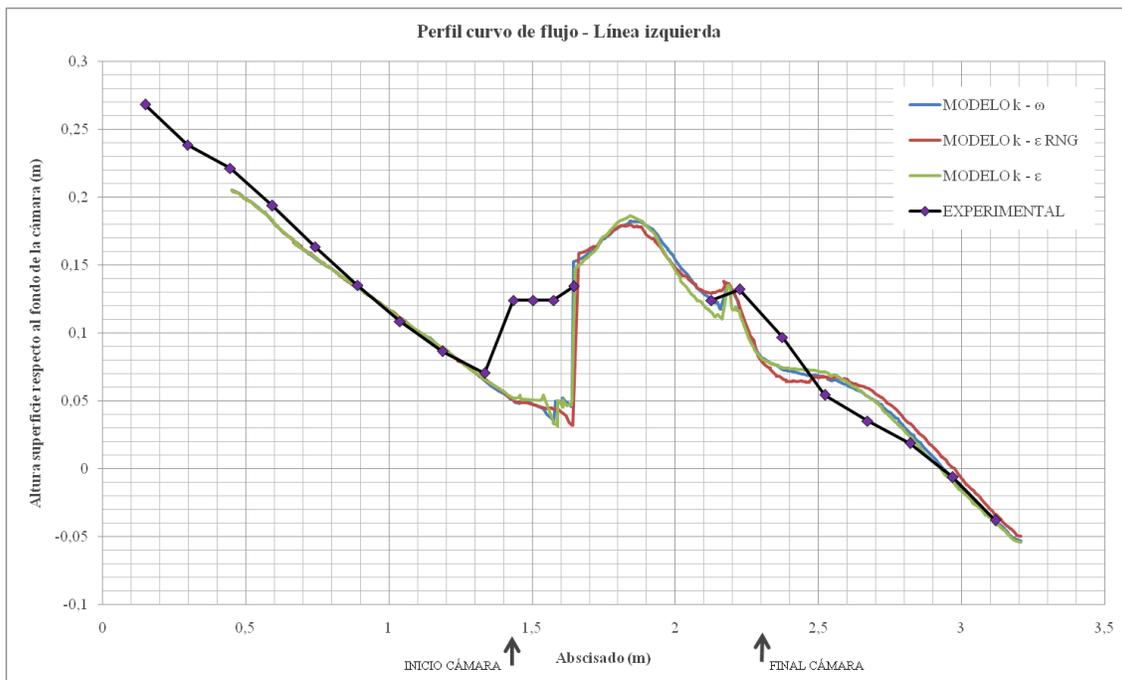
Gráfica anexa 3: Perfil recto de flujo por línea izquierda para UF-2.



Gráfica anexa 4: Perfil curvo de flujo por la línea central para UF-2.



Gráfica anexo 5: Perfil curvo de flujo por línea derecha para UF-2.



Gráfica anexo 6: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para UF-2.

## 7.2. Escenario de modelación UF-3

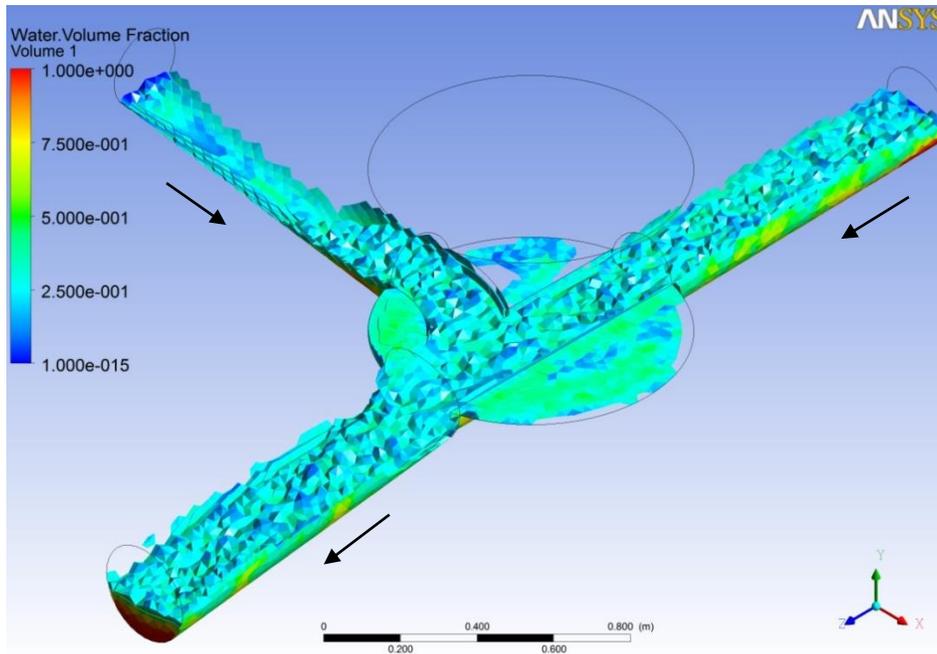


Figura anexa 5: Superficie del flujo en UF-3. Modelo k- $\epsilon$  estándar.

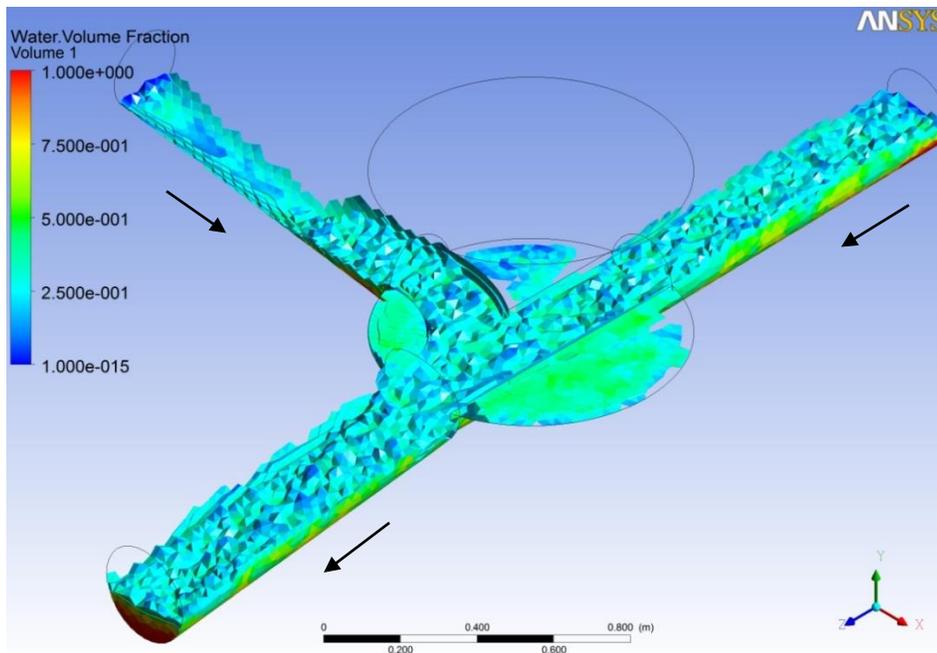


Figura anexa 6: Superficie del flujo en UF-3. Modelo k- $\epsilon$  RNG.

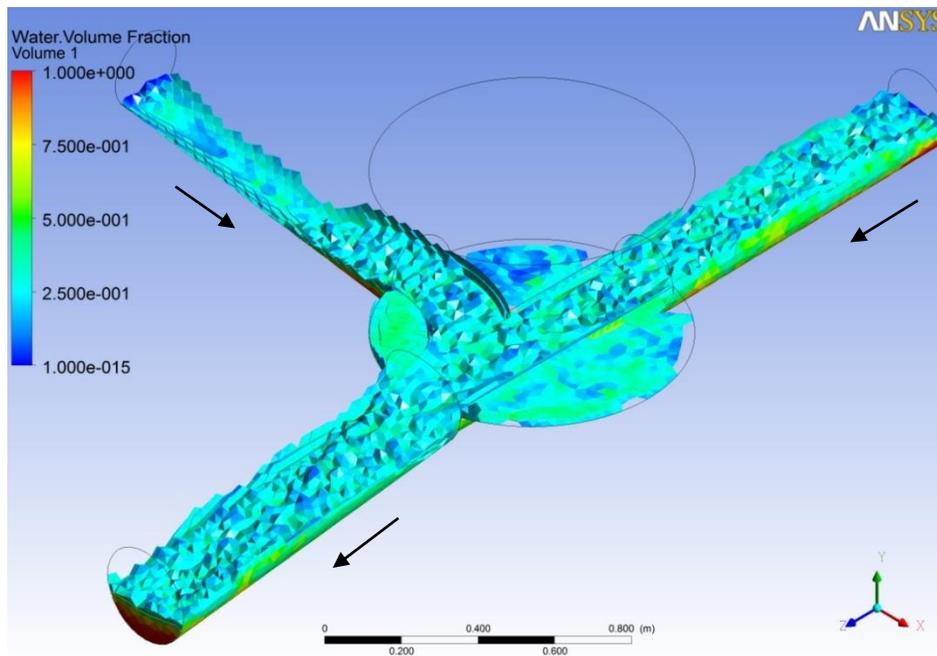


Figura anexa 7: Superficie del flujo en UF-3. Modelo k- $\omega$

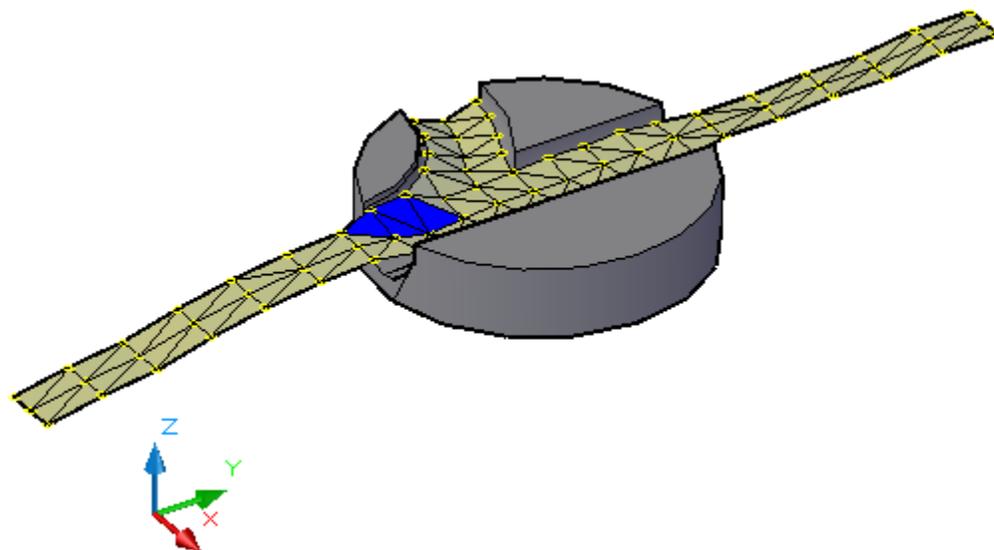
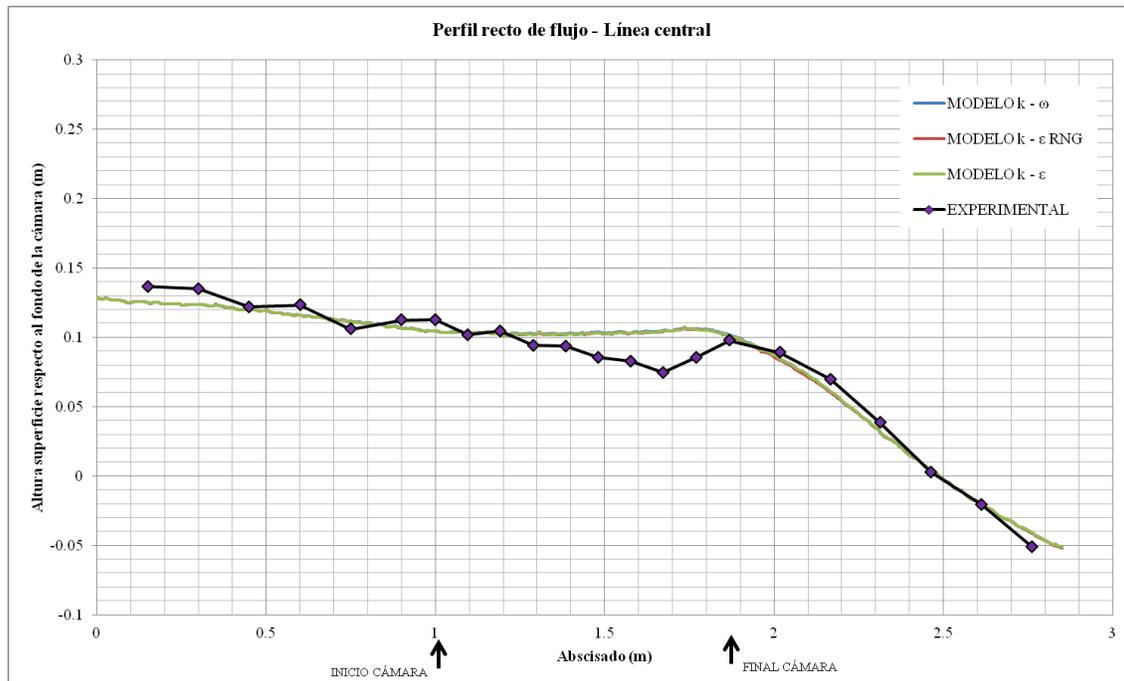
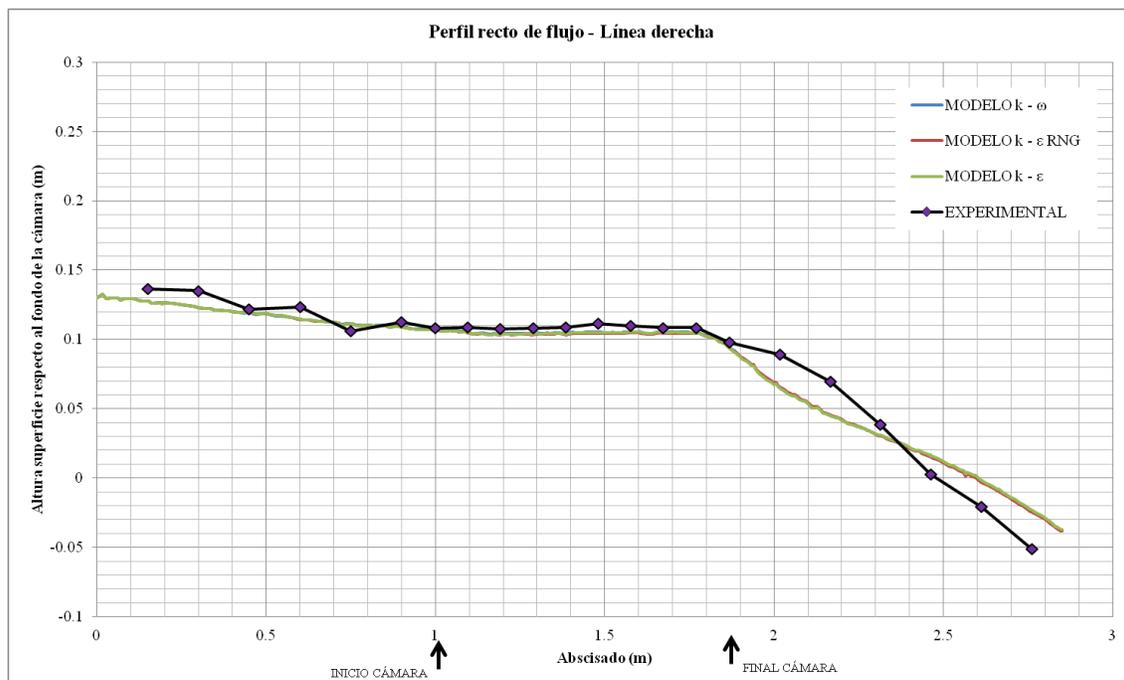


Figura anexa 8: Patrón de flujo tridimensional para UF-3. Tomado de (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

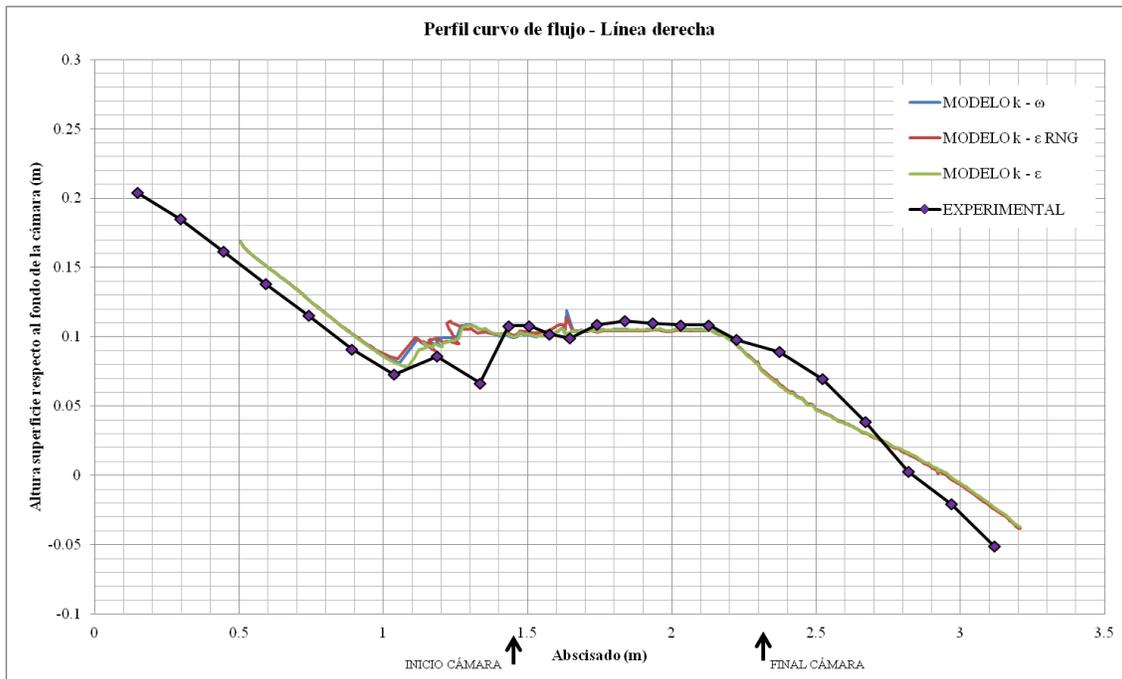


Gráfica anexa 7: Perfil recto de flujo por línea central para UF-3.

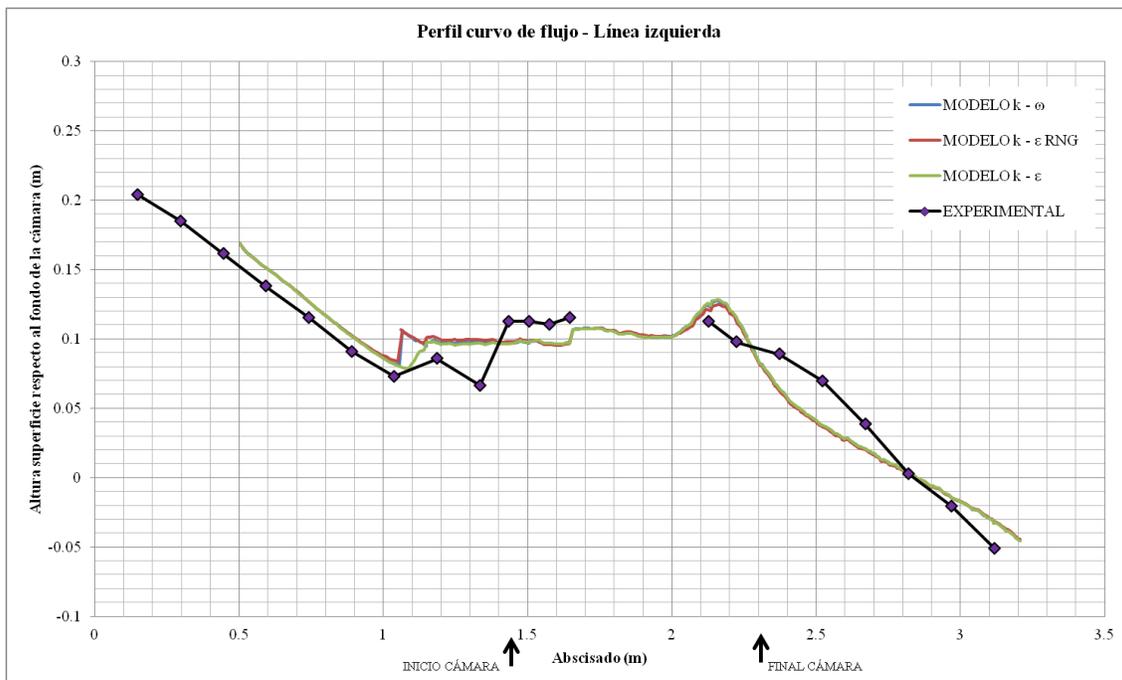


Gráfica anexa 8: Perfil recto de flujo por línea derecha para UF-3.





Gráfica anexa 11: Perfil curvo de flujo por línea derecha para UF-3.



Gráfica anexa 12: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para UF-3.

### 7.3. Escenario de modelación UF-4

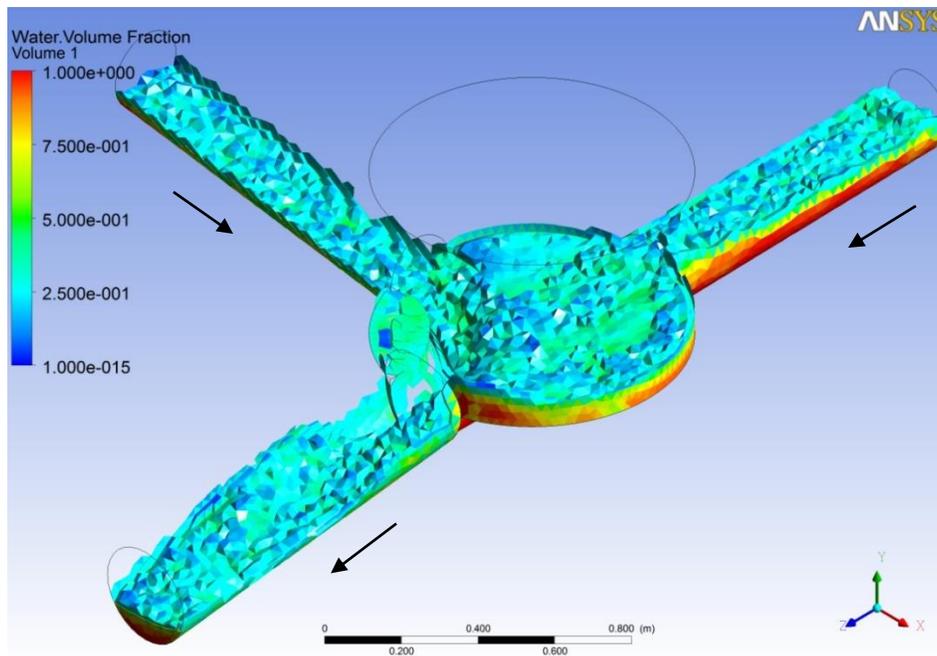


Figura anexa 9: Superficie del flujo en UF-4. Modelo k- $\epsilon$  estándar.

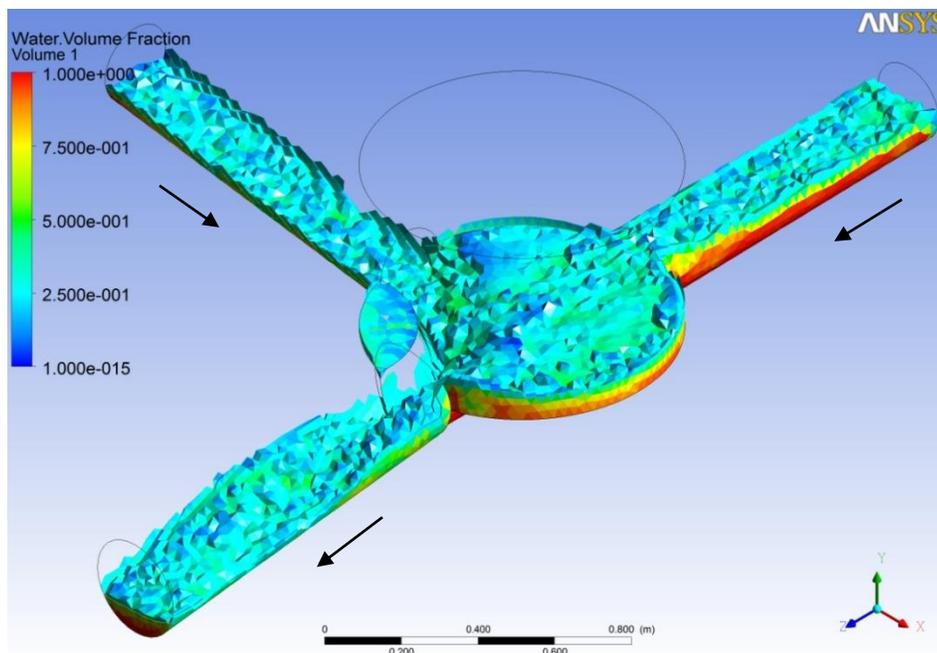


Figura anexa 10: Superficie del flujo en UF-4. Modelo k- $\epsilon$  RNG.

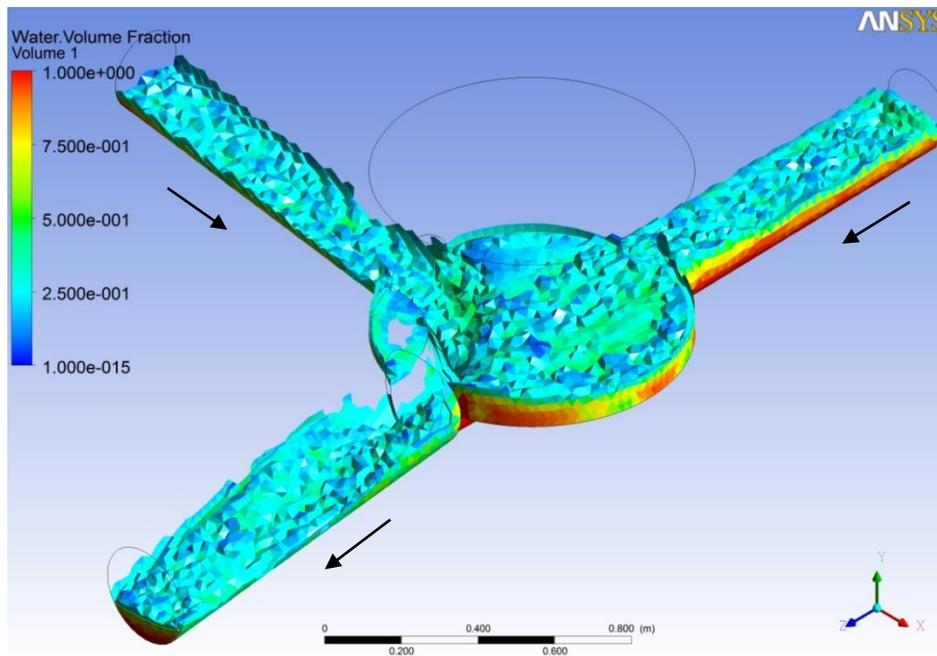


Figura anexa 11: Superficie del flujo en UF-4. Modelo  $k-\omega$

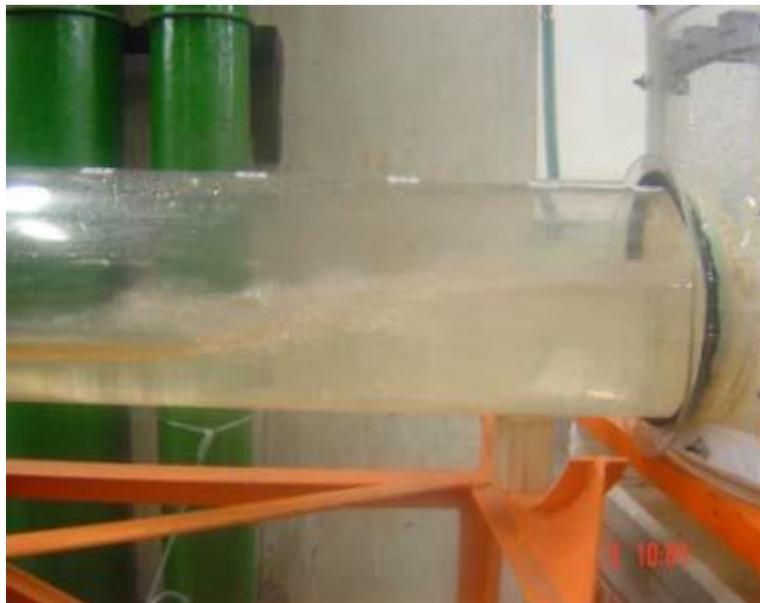
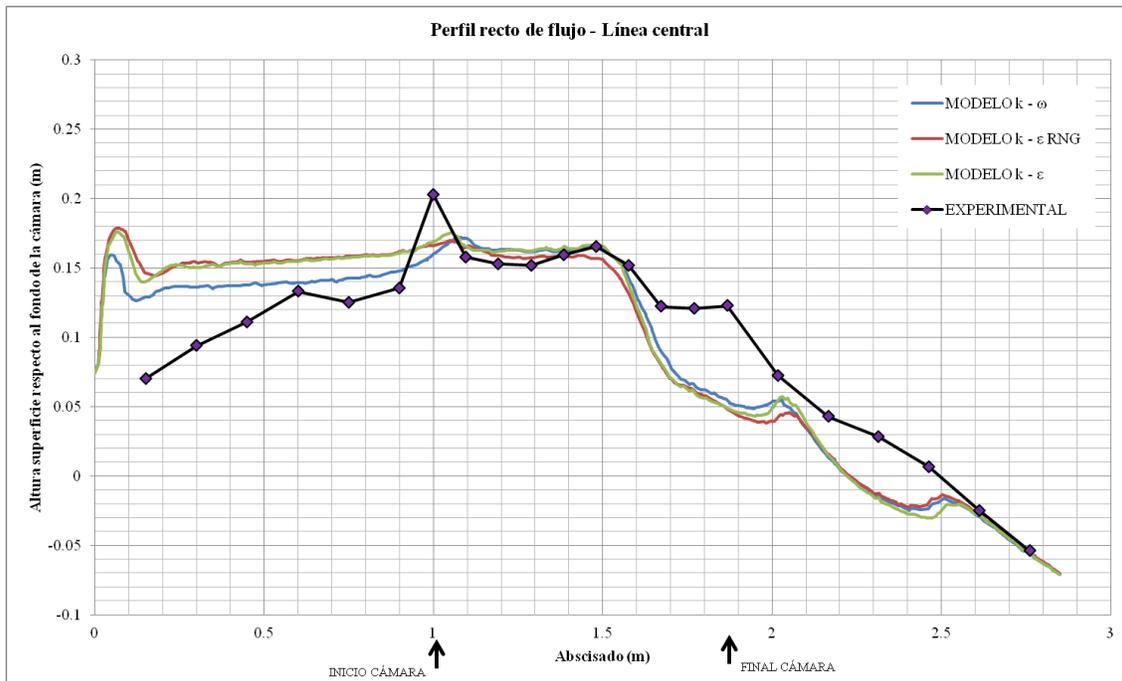
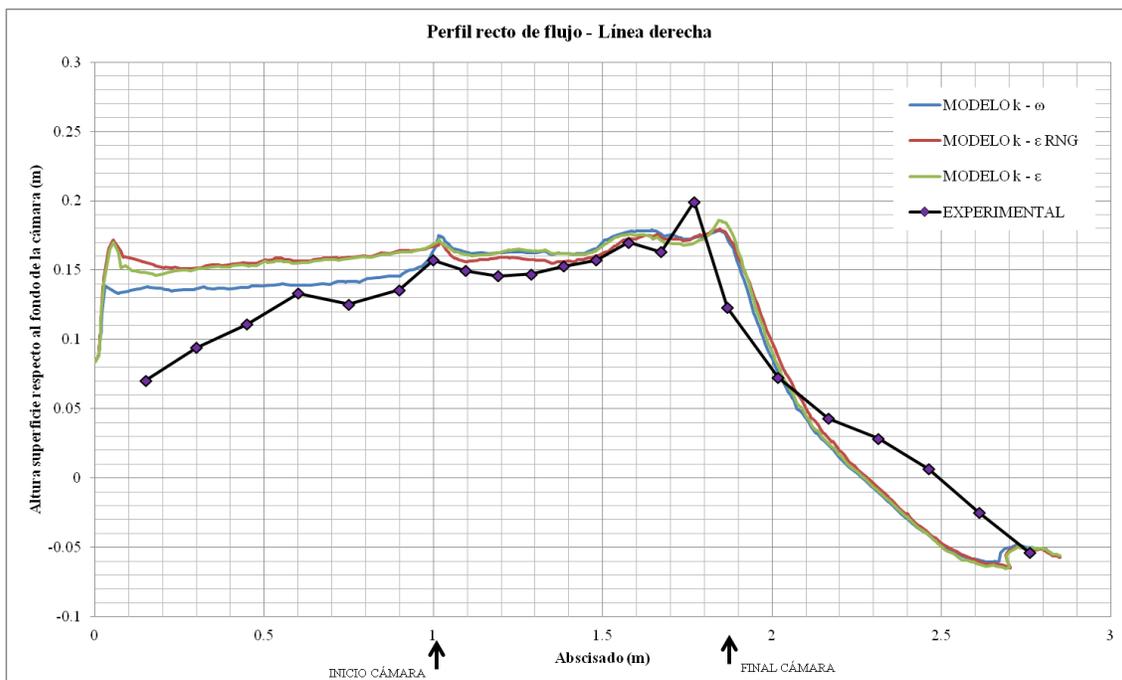


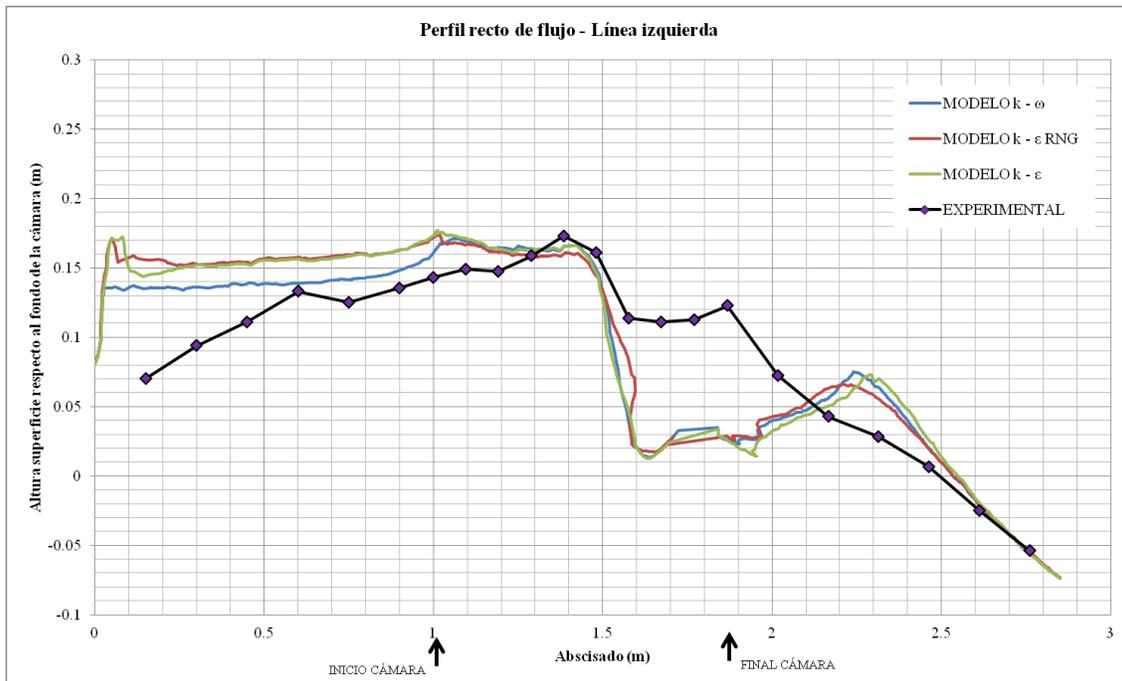
Figura anexa 12: Formación de un resalto en la tubería principal. Tomado de (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).



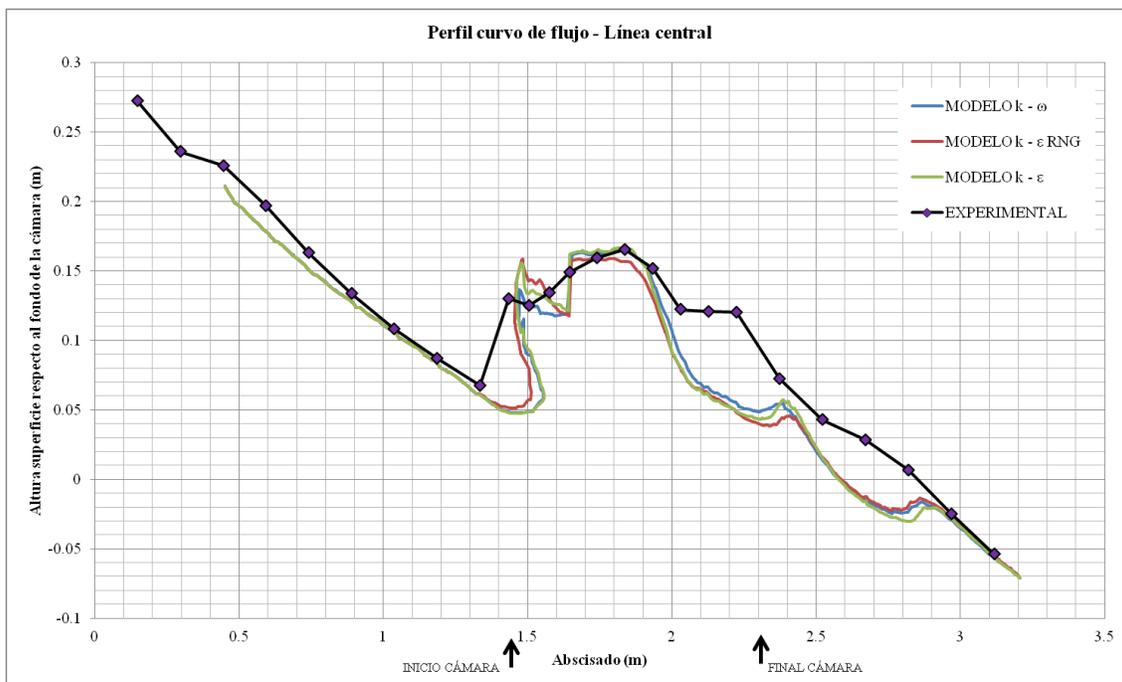
Gráfica anexa 13: Perfil recto de flujo por línea central para UF-4.



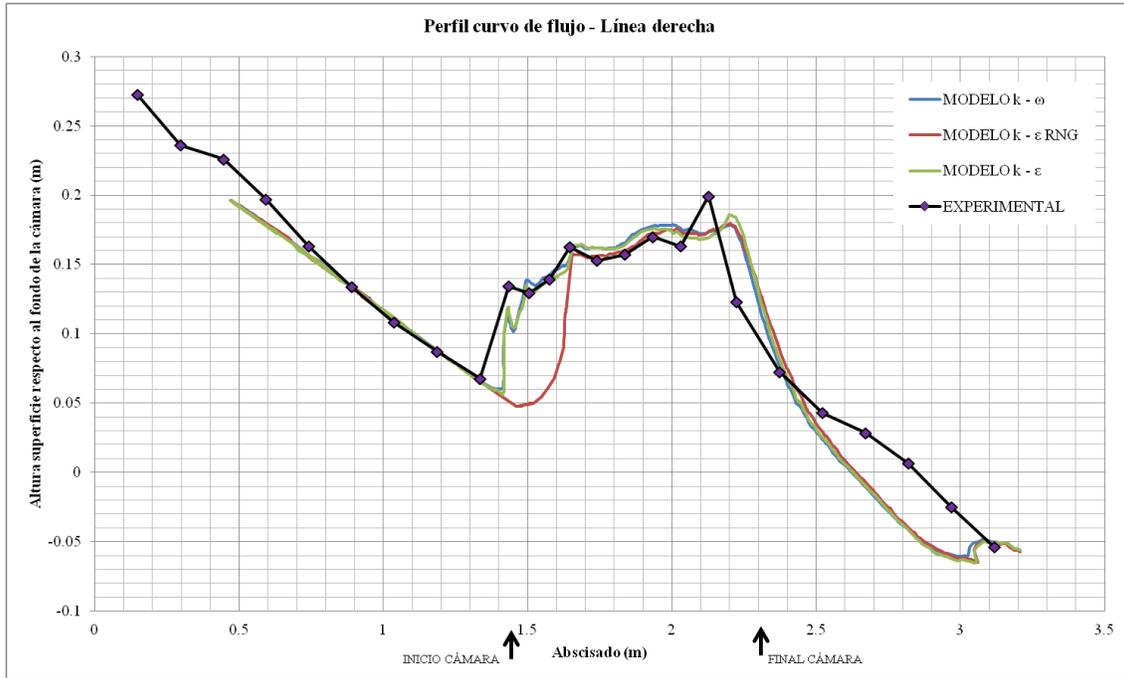
Gráfica anexa 14: Perfil recto de flujo por línea derecha para UF-4.



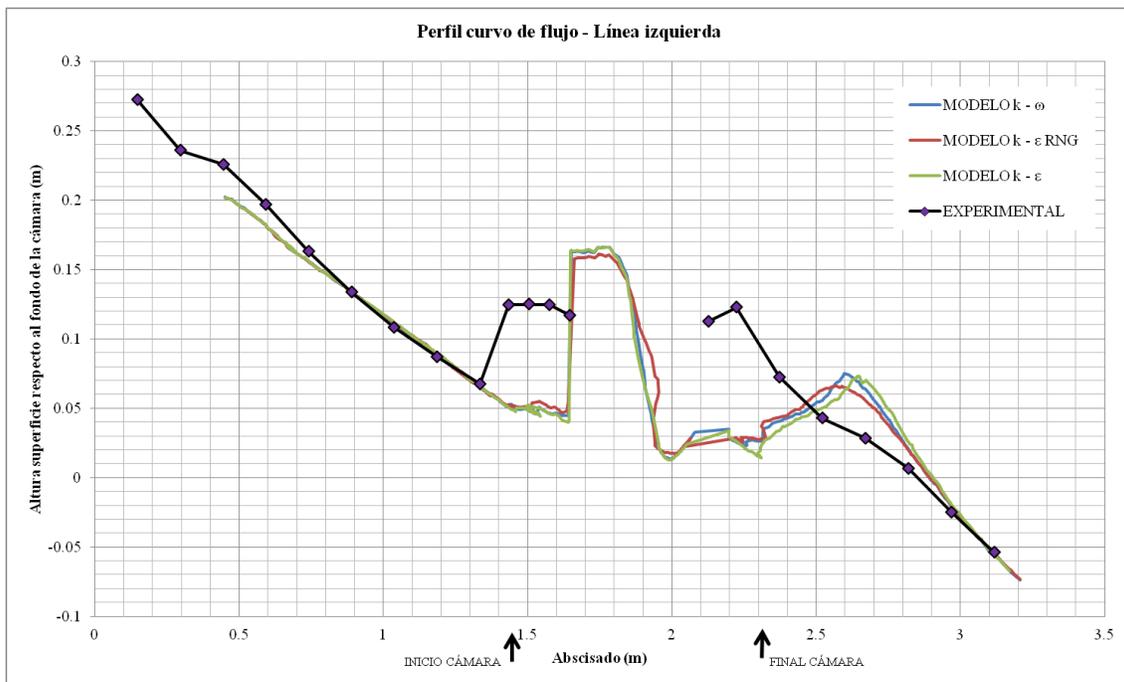
Gráfica anexa 15: Perfil recto de flujo por línea izquierda para UF-4.



Gráfica anexa 16: Perfil curvo de flujo por línea central para UF-4.



Gráfica anexa 17: Perfil curvo de flujo por línea derecha para UF-4.



Gráfica anexa 18: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para UF-4.

#### 7.4. Escenario de modelación UF-5

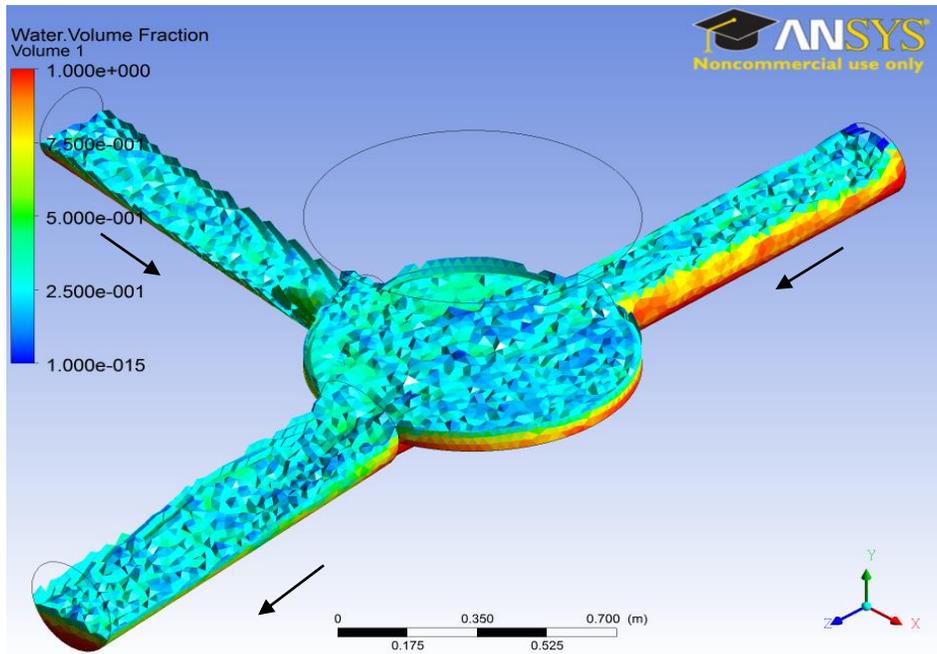


Figura anexa 13: Superficie del flujo en UF-5. Modelo k-ε estándar.

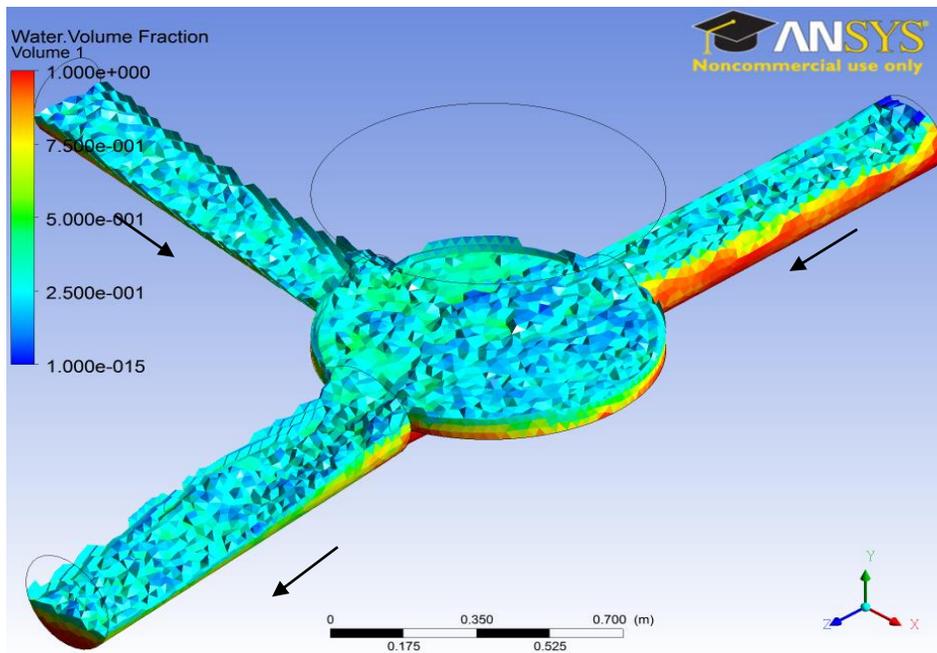


Figura anexa 14: Superficie del flujo en UF-5. Modelo k-ε RNG.

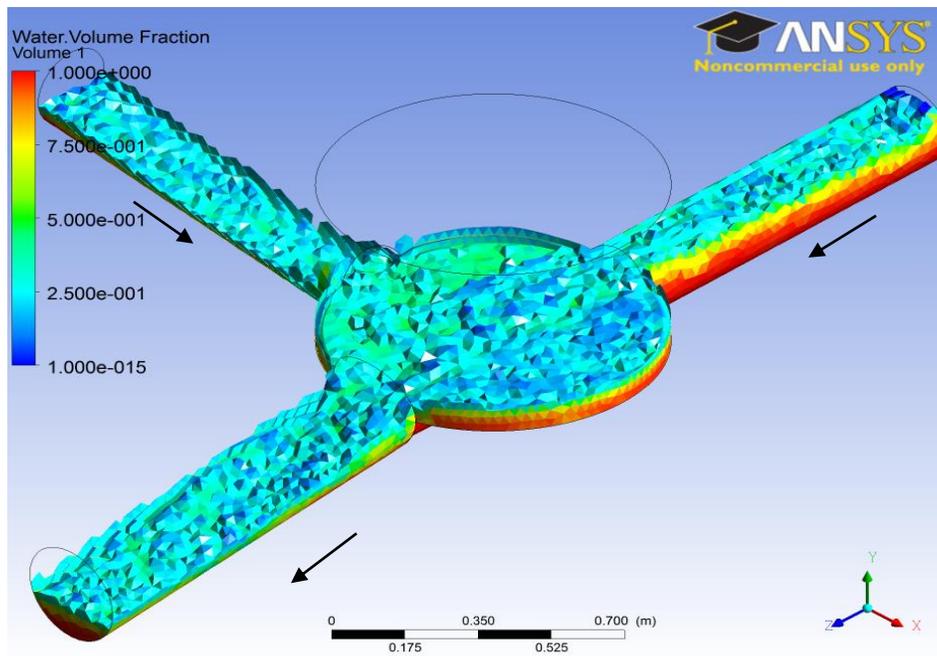
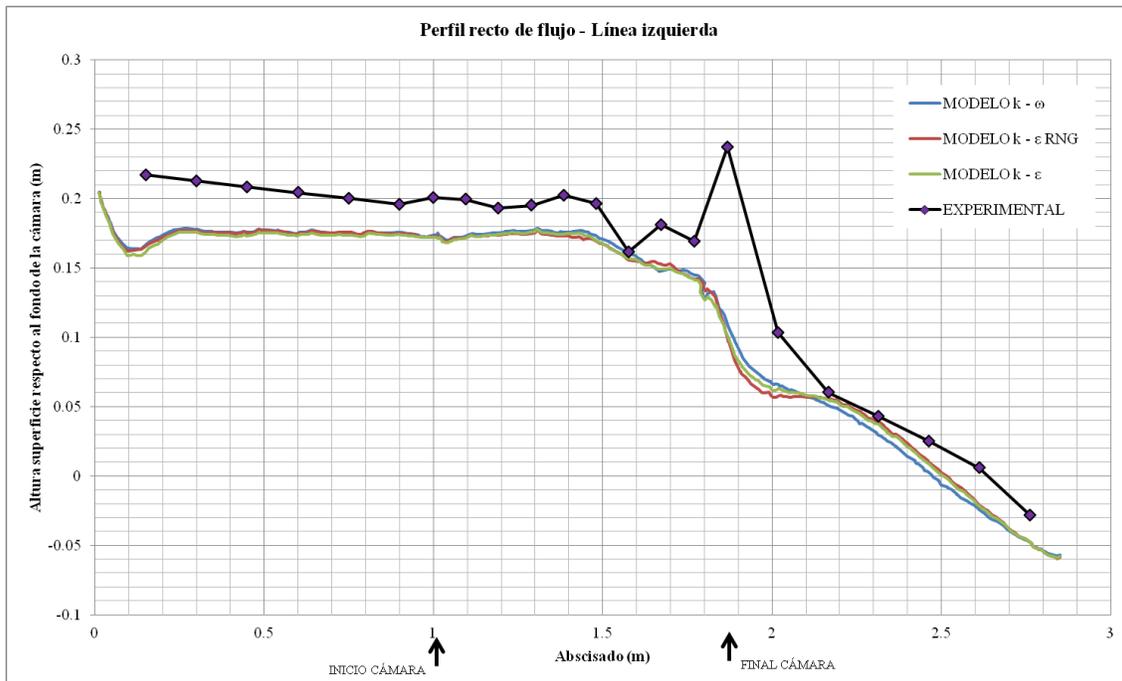


Figura anexa 15: Superficie del flujo en UF-5. Modelo k- $\omega$ .

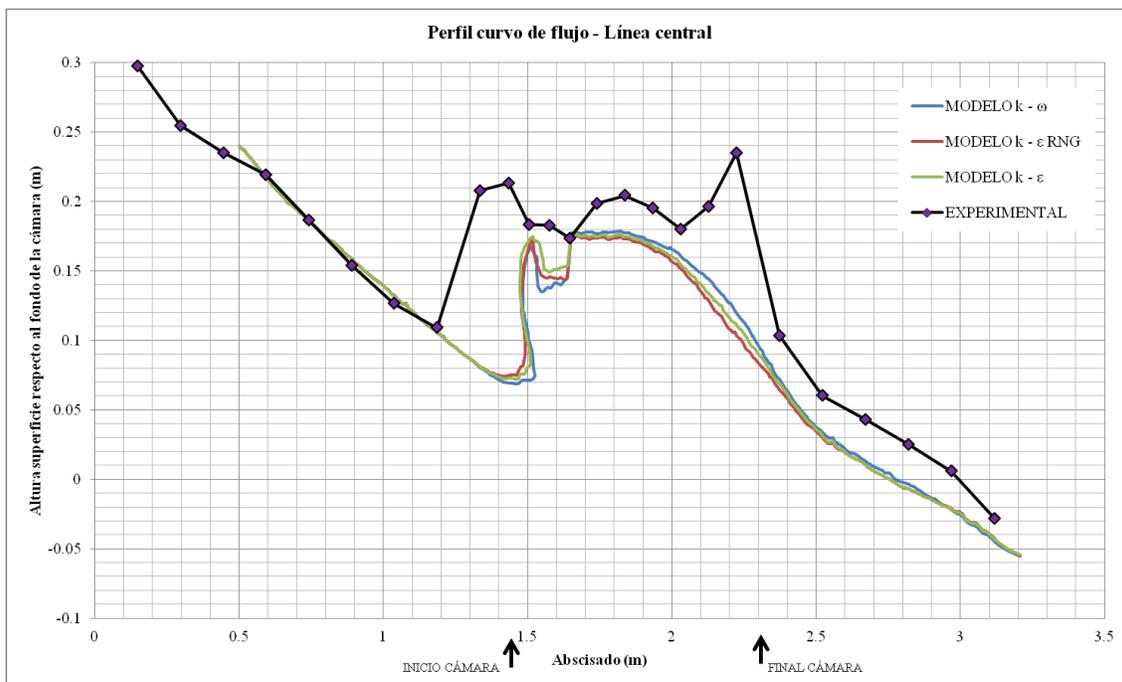


Figura anexa 16: Formación de un resalto en la tubería principal. Tomado de (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).

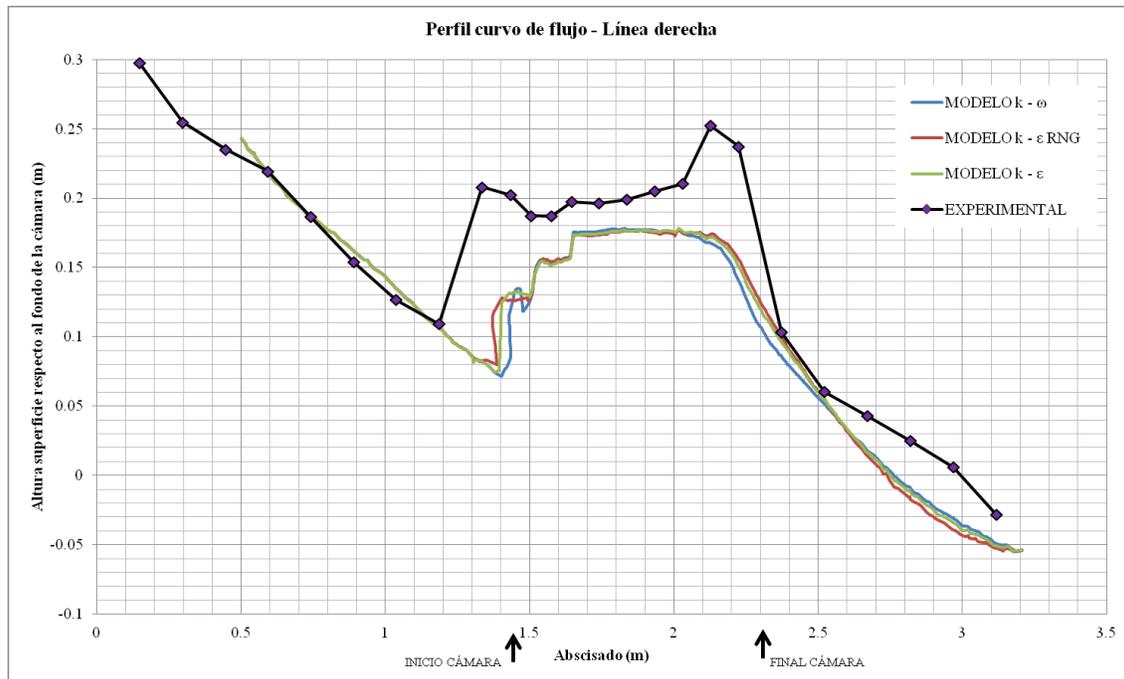




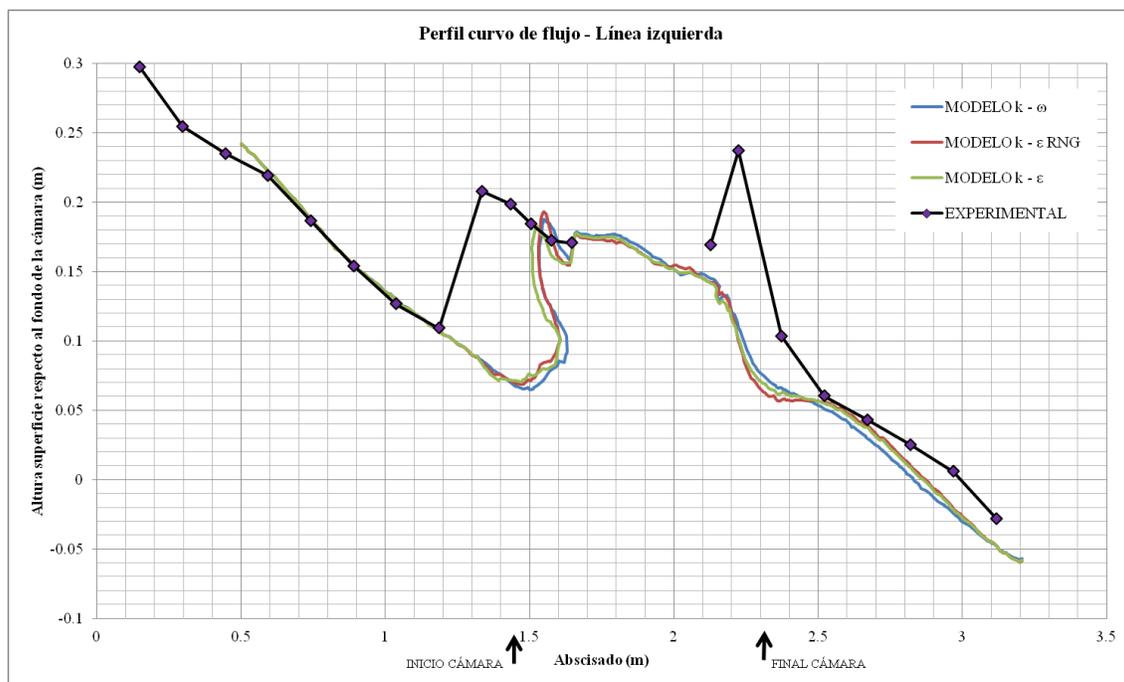
Gráfica anexa 21: Perfil recto de flujo por línea izquierda para UF-5.



Gráfica anexa 22: Perfil curvo de flujo por línea central para UF-5.



Gráfica anexa 23: Perfil curvo de flujo por línea derecha para UF-5.



Gráfica anexa 24: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para UF-5.

## 7.5. Escenario de modelación FD-3

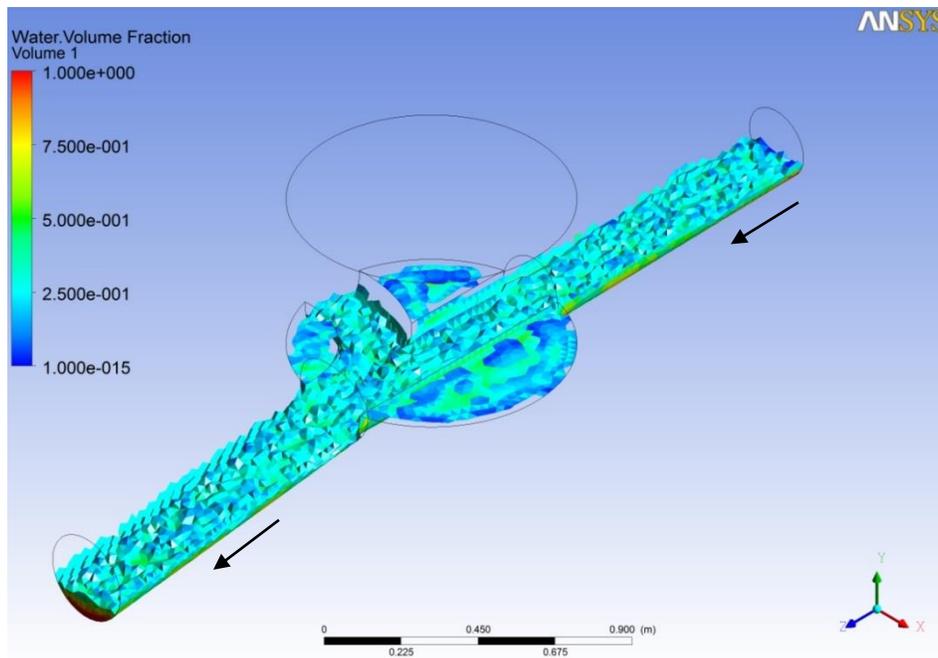


Figura anexa 17: Superficie del flujo en FD-3. Modelo k- $\epsilon$  estándar.

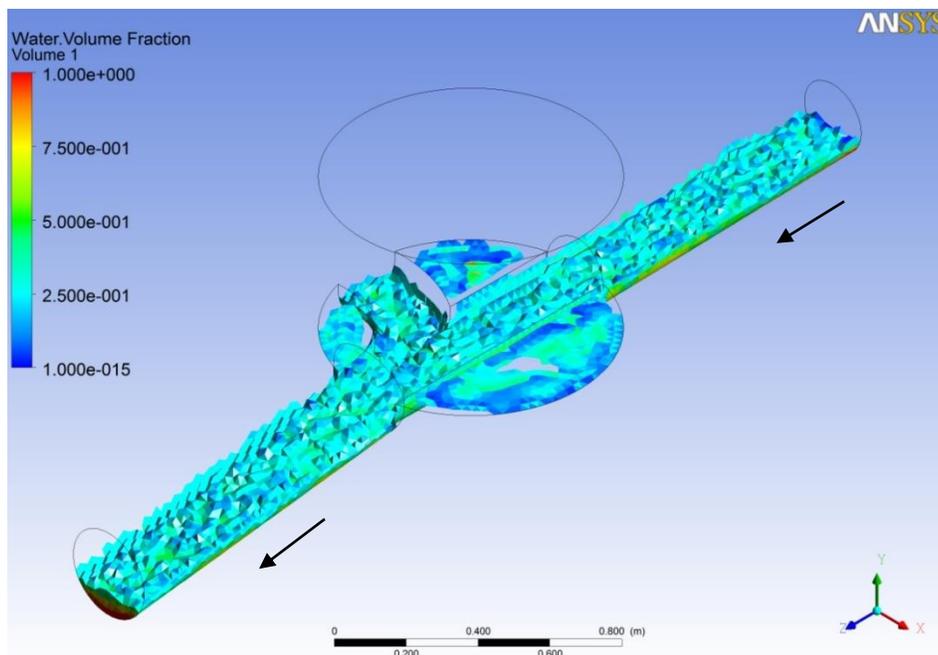


Figura anexa 18: Superficie del flujo en FD-3. Modelo k- $\epsilon$  RNG.

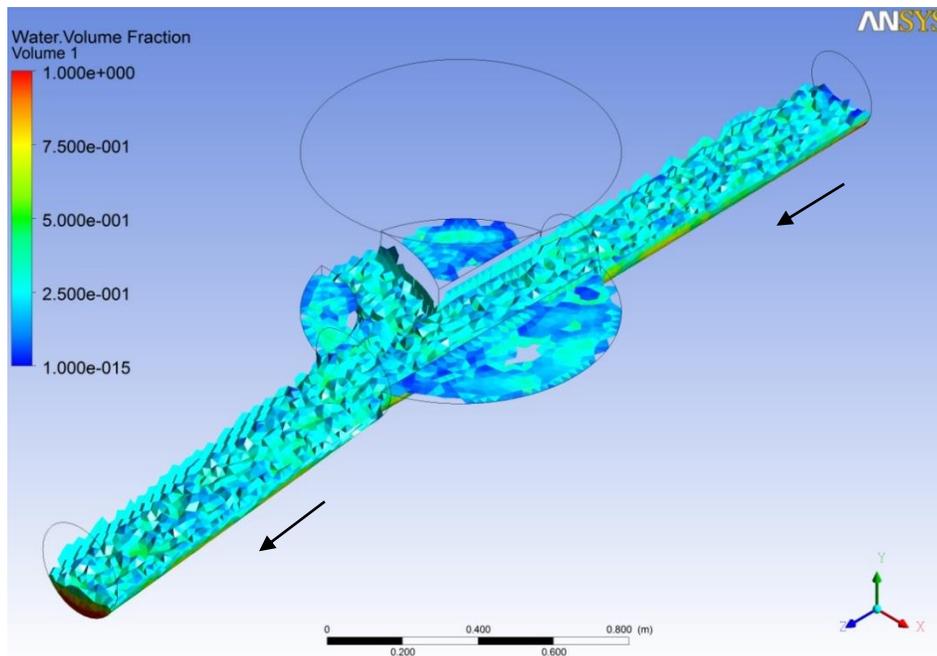


Figura anexa 19: Superficie del flujo en FD-3. Modelo k- $\omega$ .

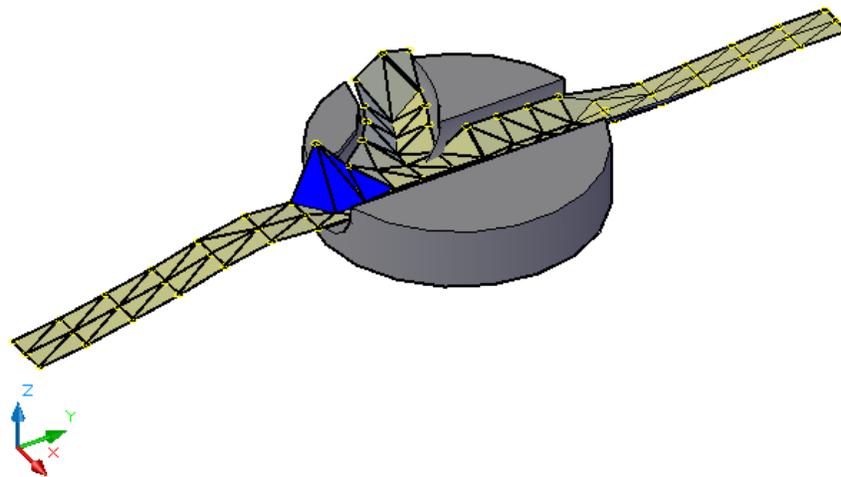
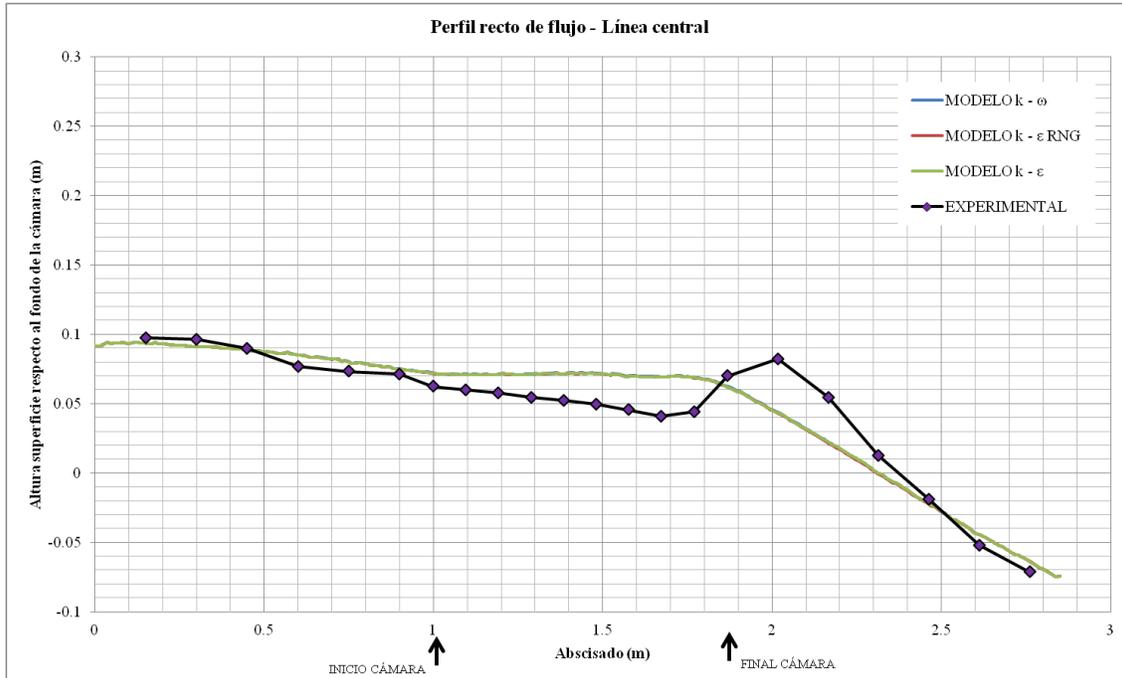
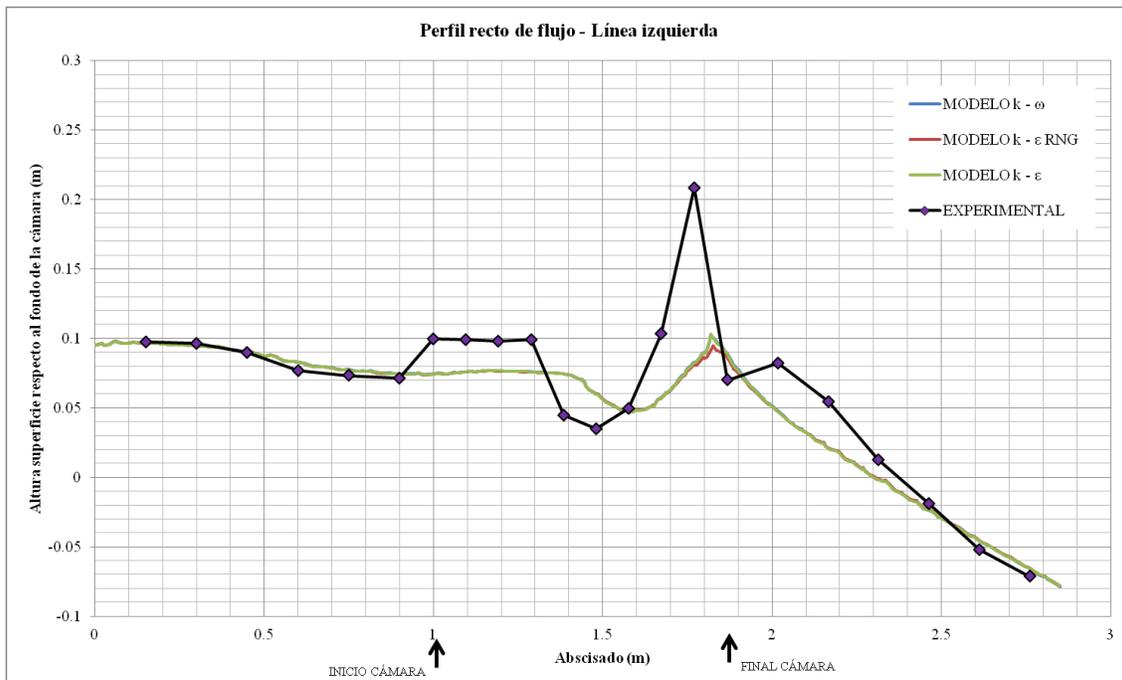


Figura anexa 20: Patrón de flujo tridimensional para FD-3. Tomado de (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).



Gráfica anexa 25: Perfil recto de flujo por la línea central para FD-3.



Gráfica anexa 26: Perfil recto de flujo por línea izquierda para FD-3.

## 7.6. Escenario de modelación FD-4

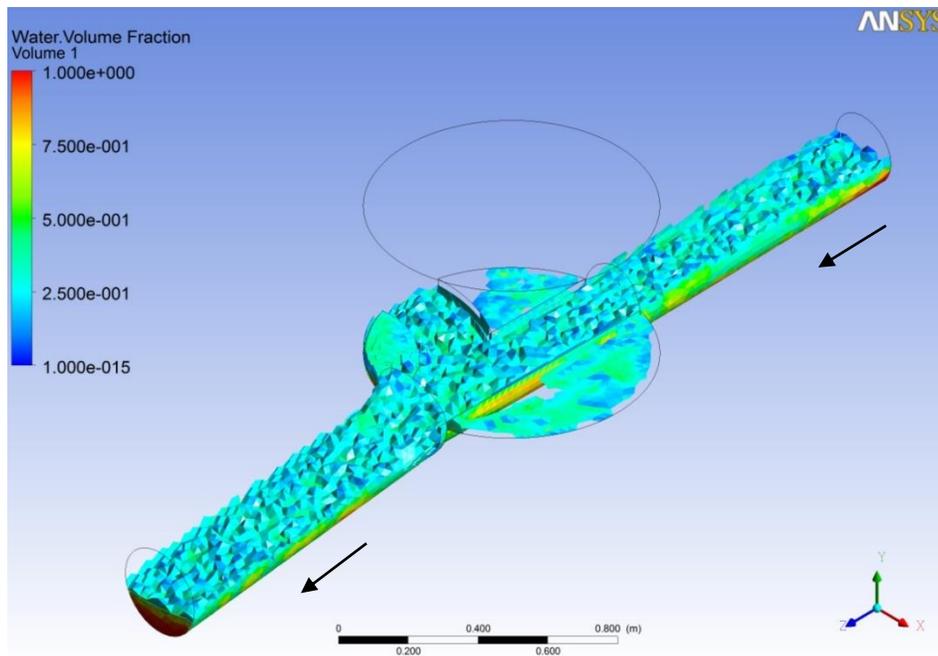


Figura anexa 21: Superficie del flujo en FD-4. Modelo k- $\epsilon$  estándar.

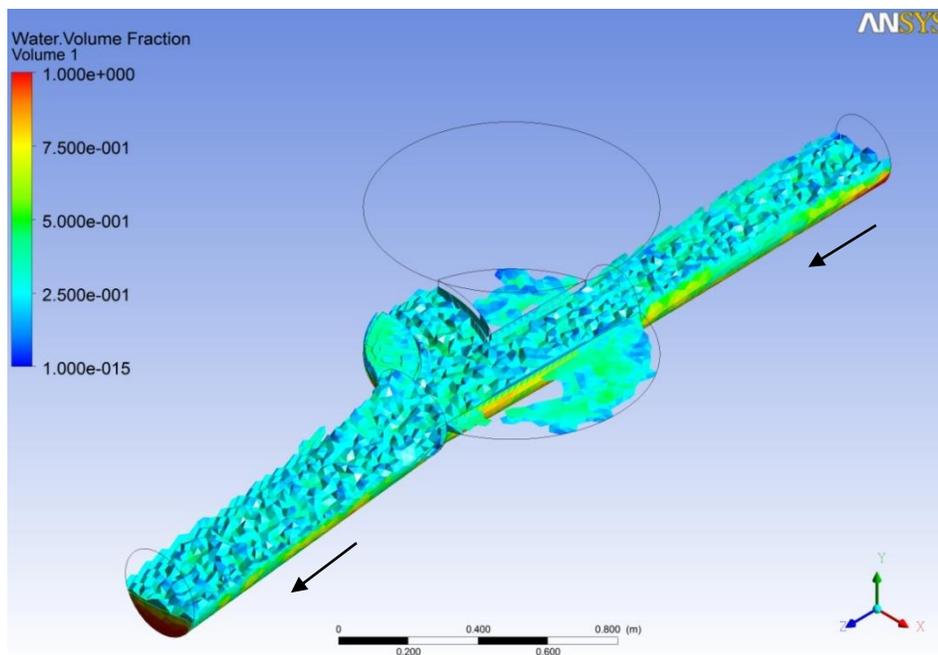


Figura anexa 22: Superficie del flujo en FD-4. Modelo k- $\epsilon$  RNG.

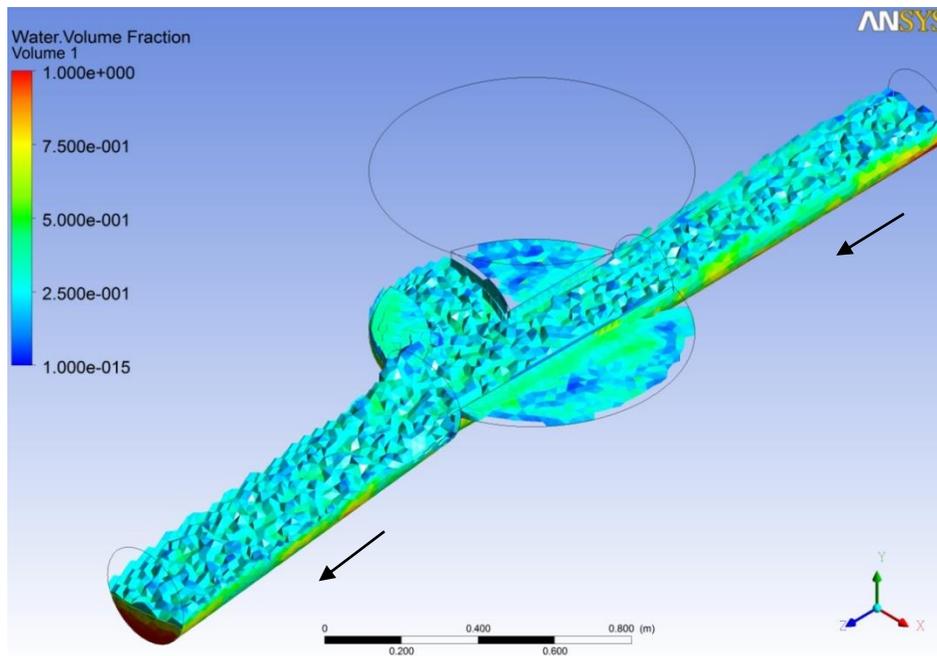


Figura anexa 23: Superficie del flujo en FD-4. Modelo k- $\omega$ .

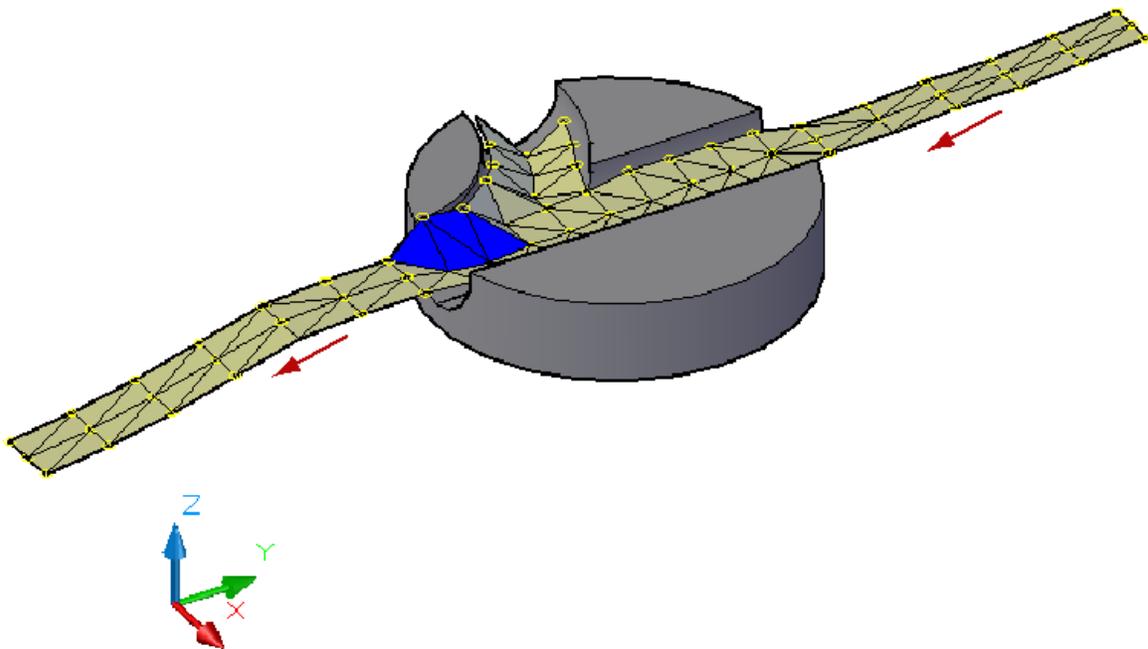
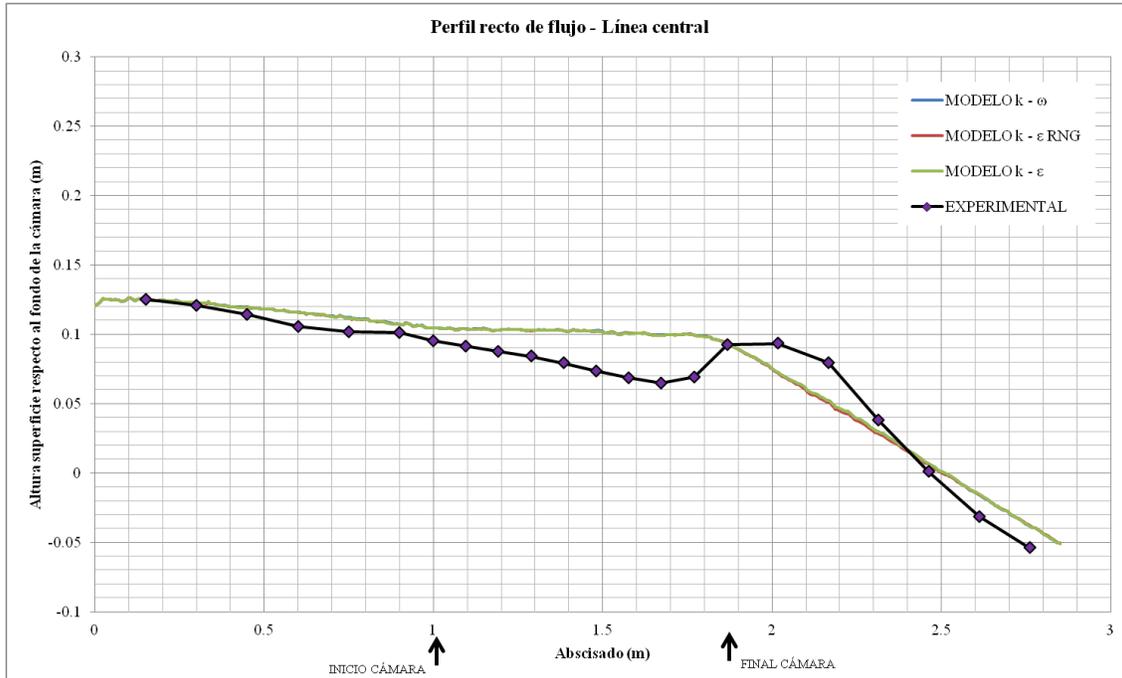
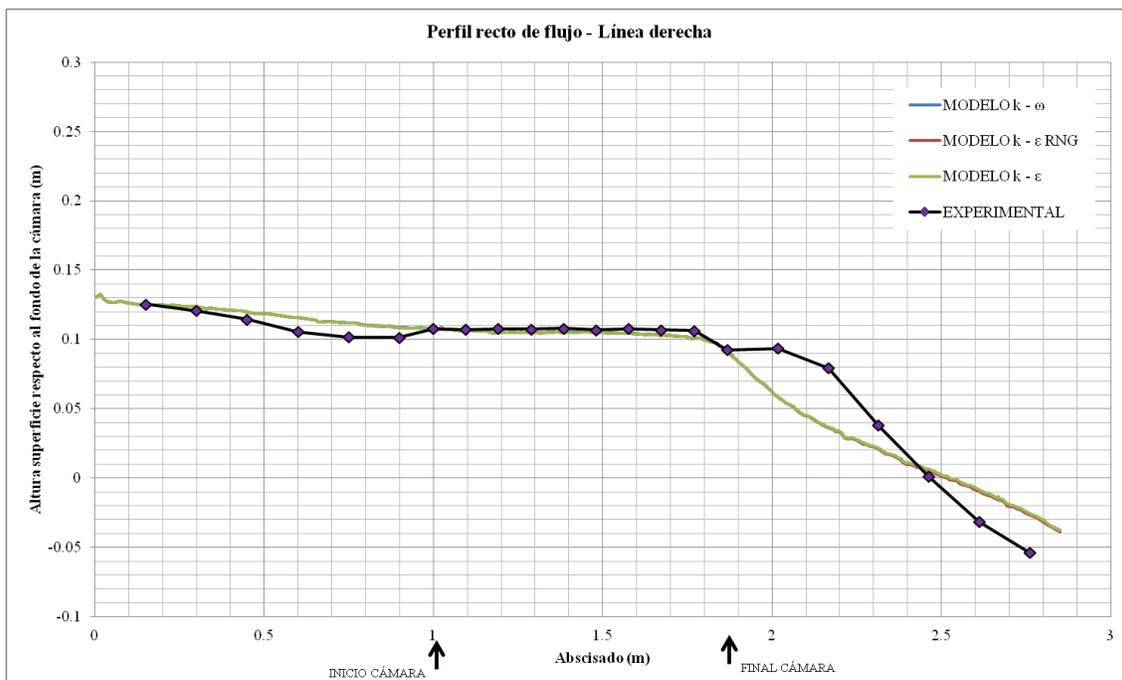


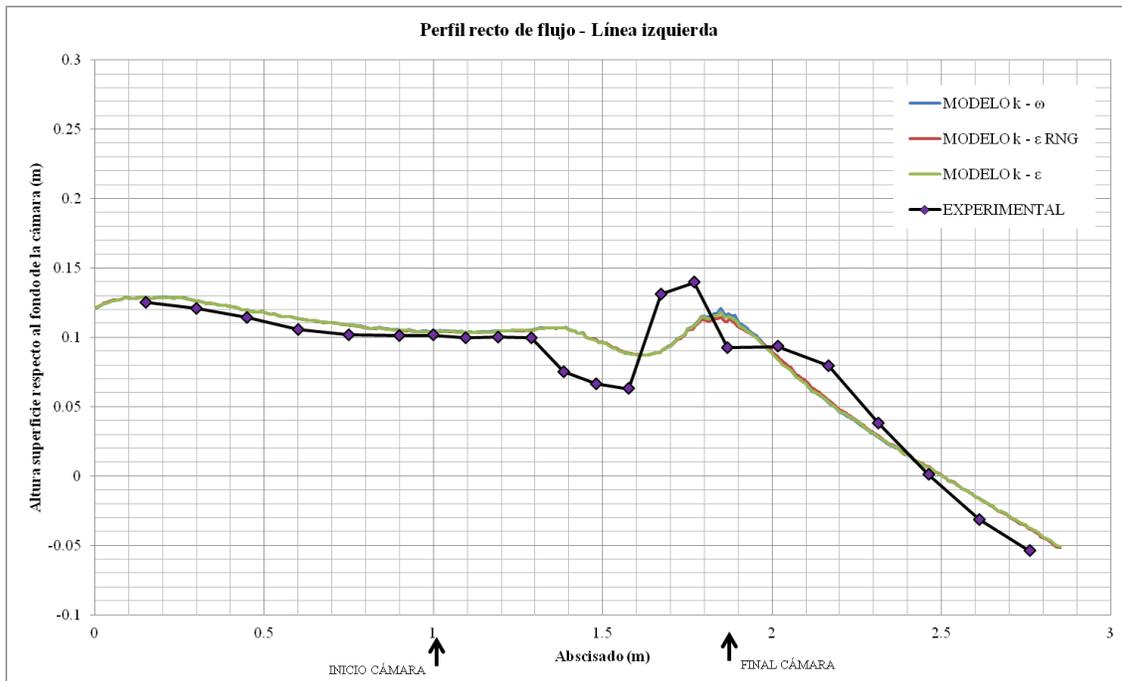
Figura anexa 24: Patrón de flujo tridimensional para FD-4. Tomado de (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).



Gráfica anexa 27: Perfil recto de flujo por línea central para FD-4.



Gráfica anexa 28: Perfil recto de flujo por línea derecha para FD-4.



Gráfica anexa 29: Perfil recto de flujo por línea izquierda para FD-4.

### 7.7. Escenario de modelación FD-6

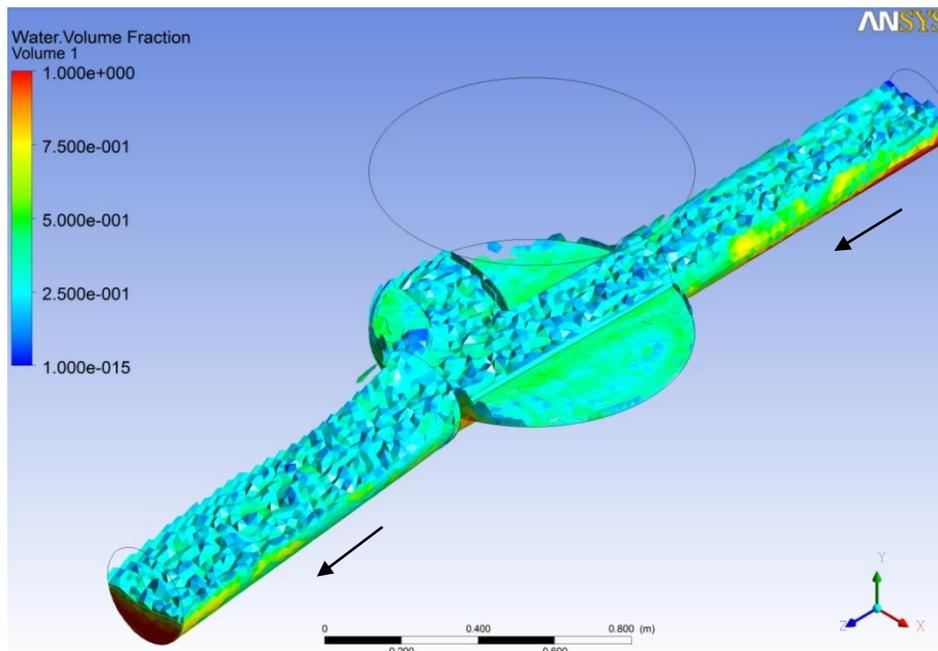


Figura anexa 25: Superficie del flujo en FD-6. Modelo k-ε estándar.

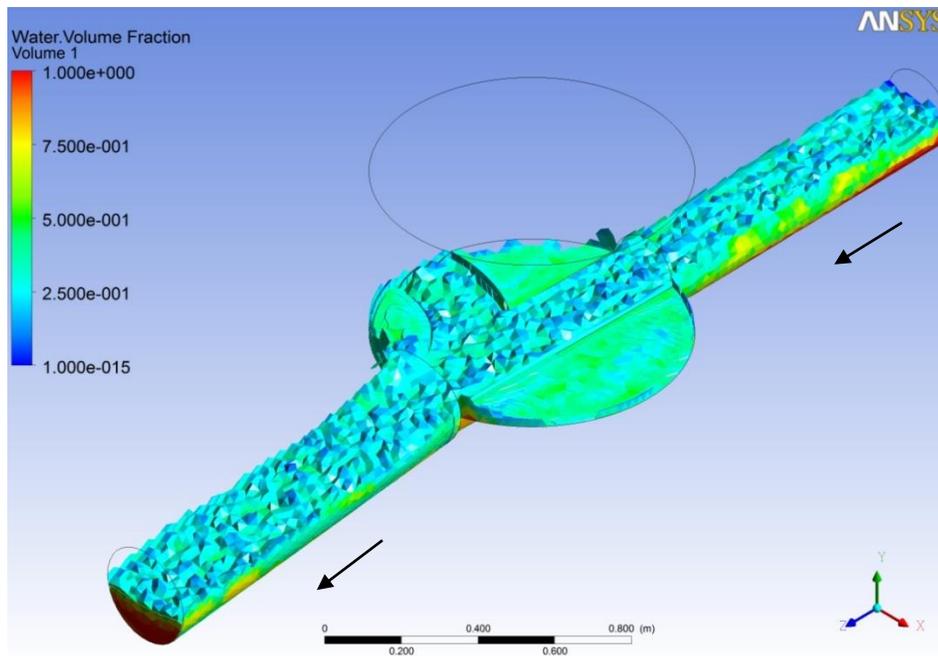


Figura anexa 26: Superficie del flujo en FD-6. Modelo k- $\epsilon$  RNG

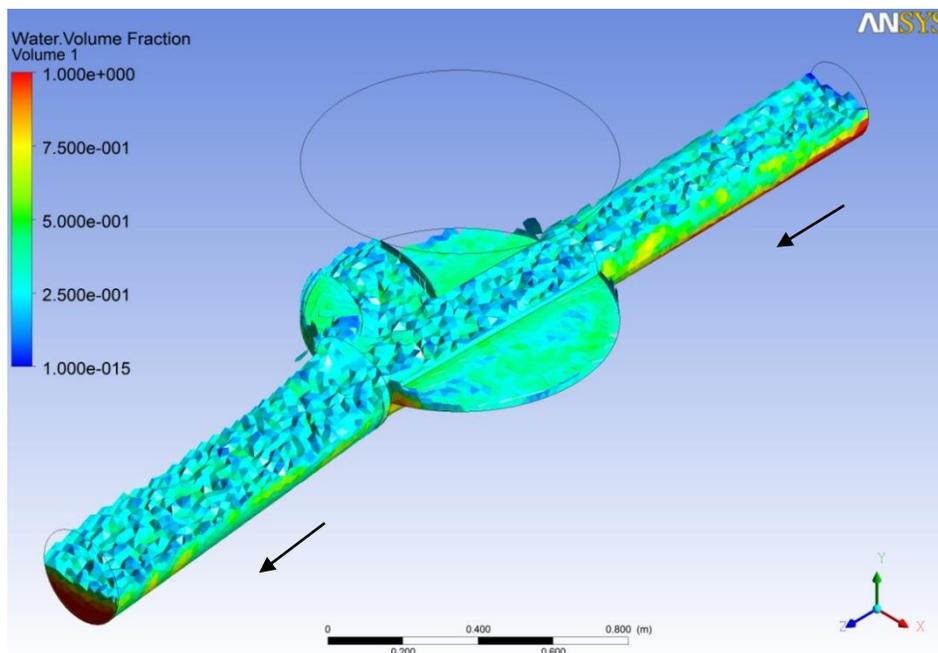


Figura anexa 27: Superficie del flujo en FD-6. Modelo k- $\omega$ .

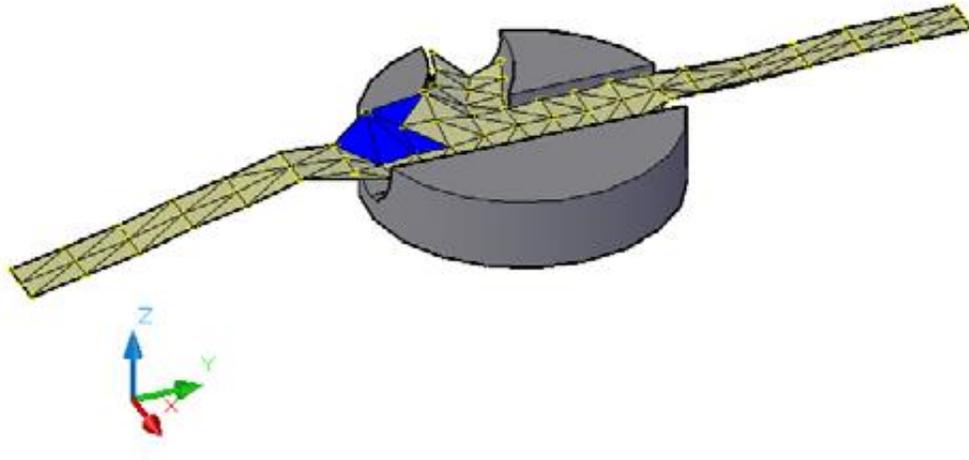
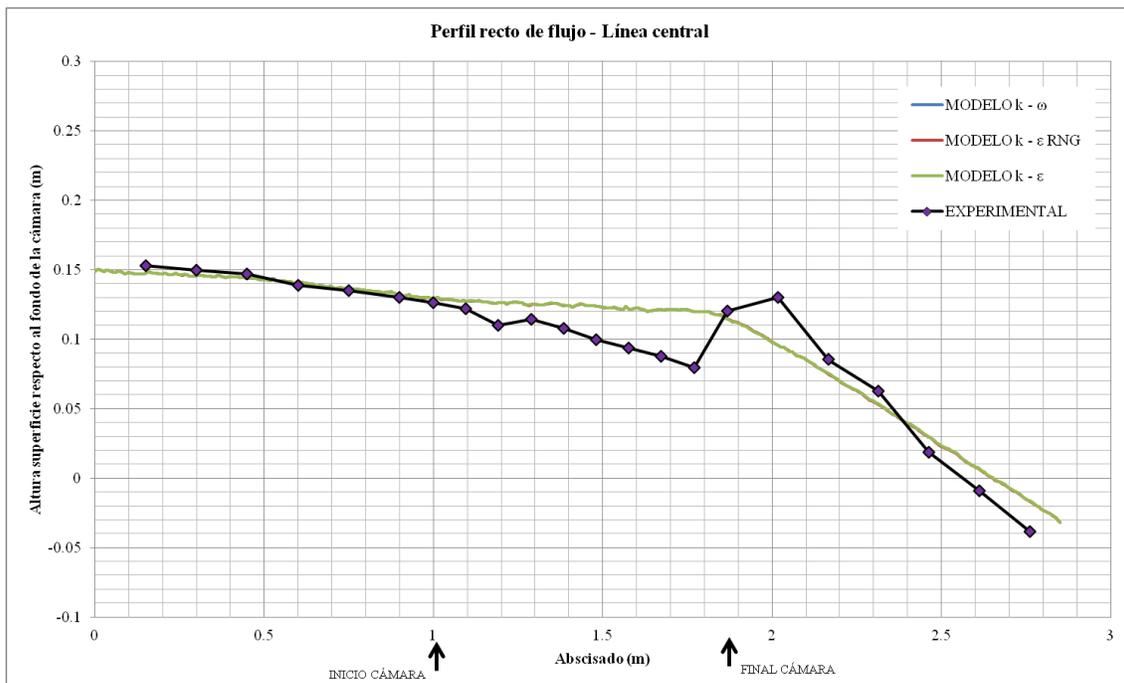
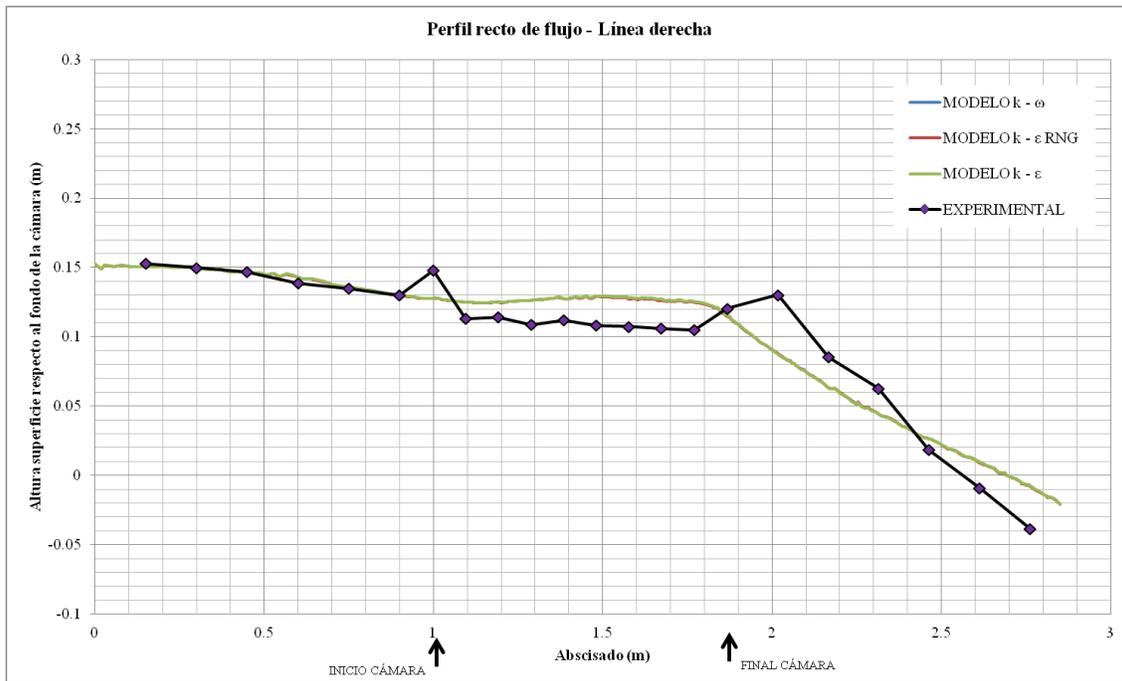


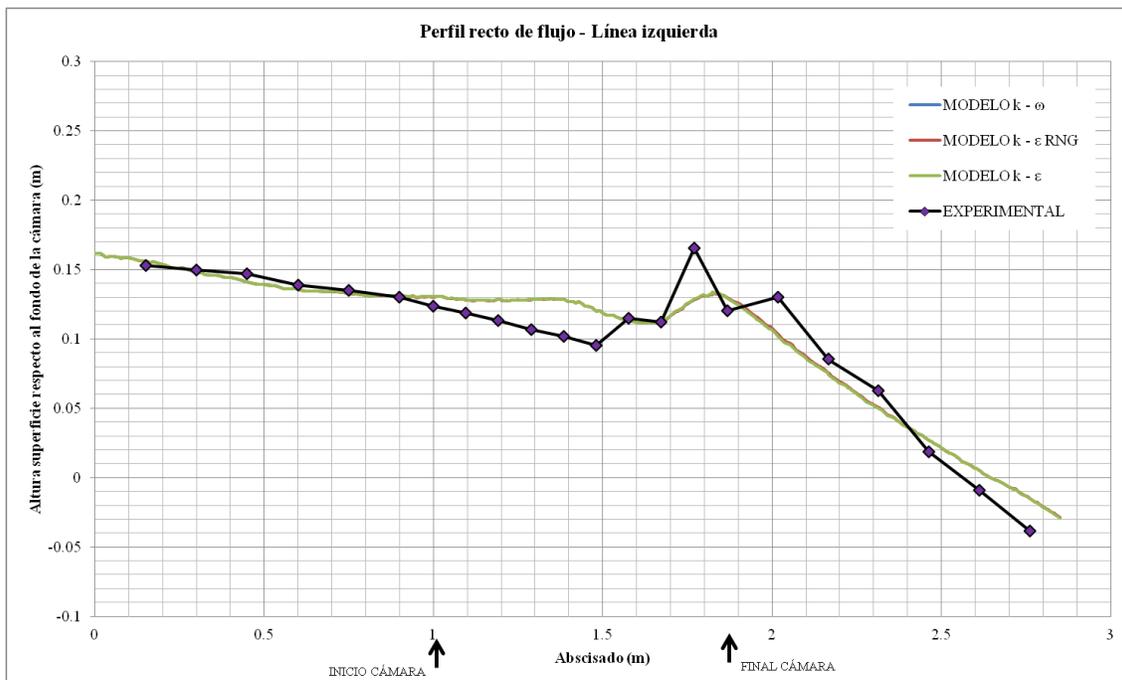
Figura anexa 28: Patrón de flujo tridimensional para FD-6. Tomado de (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).



Gráfica anexa 30: Perfil recto de flujo por línea central para FD-6.



Gráfica anexa 31: Perfil recto de flujo por línea derecha para FD-6.



Gráfica anexa 32: Perfil recto de flujo por línea izquierda para FD-6.

## 7.8. Escenario de modelación FD-8

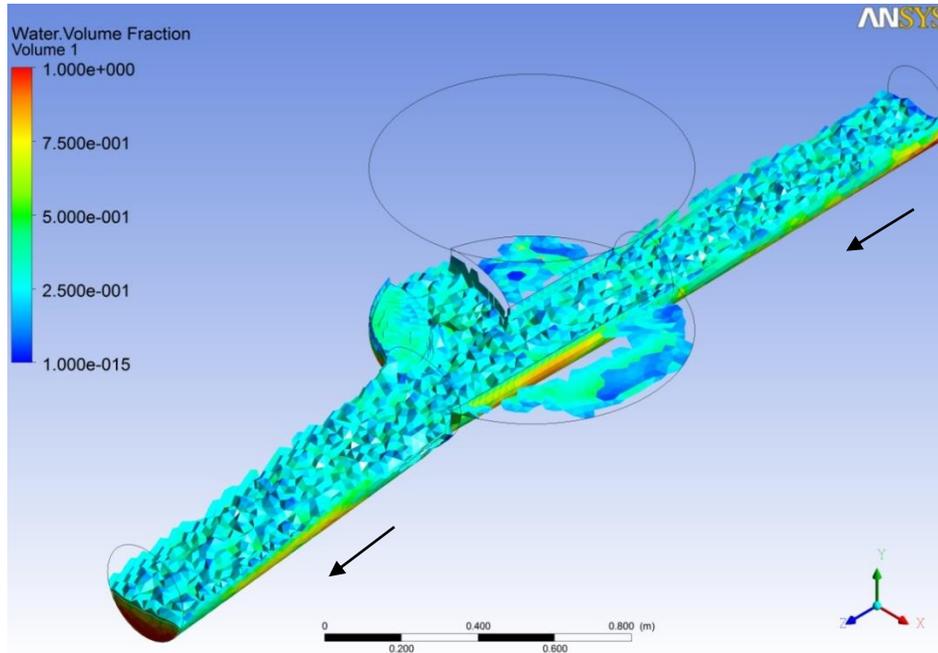


Figura anexa 29: Superficie del flujo en FD-8. Modelo k-ε estándar.

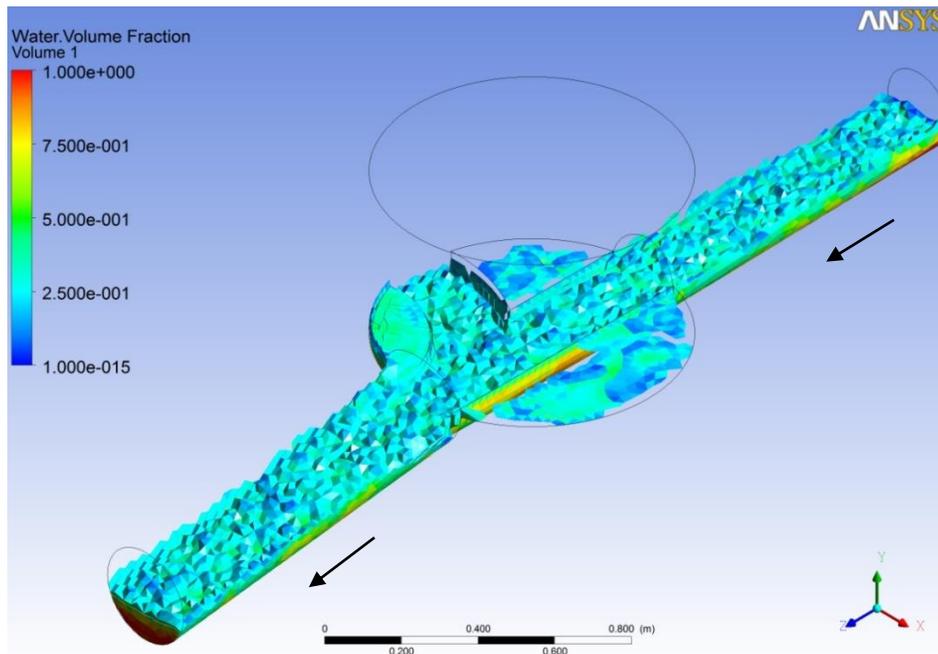


Figura anexa 30: Superficie del flujo en FD-8. Modelo k-ε RNG

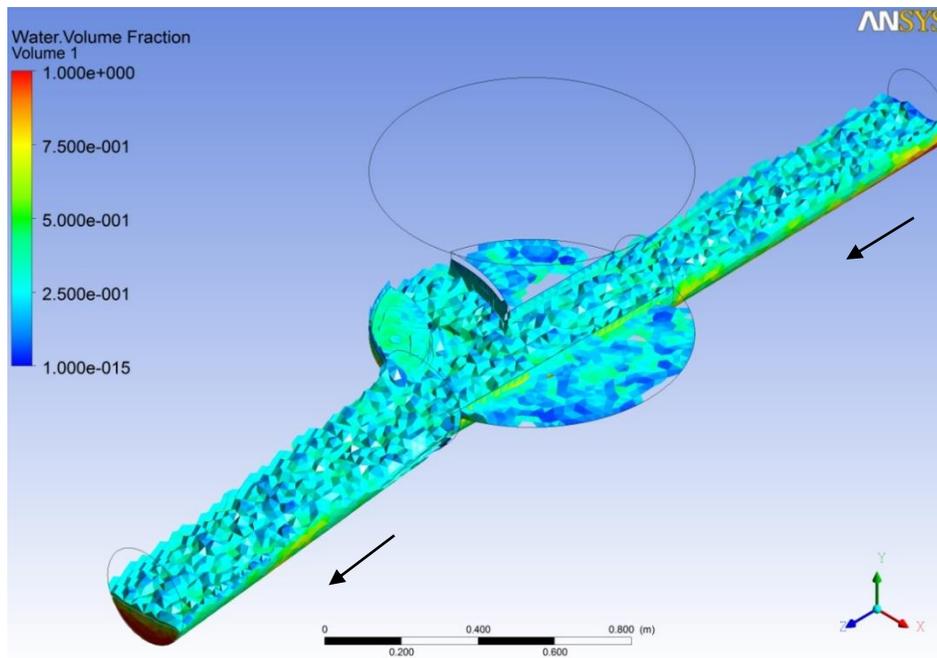


Figura anexa 31: Superficie del flujo en FD-8. Modelo k- $\omega$ .

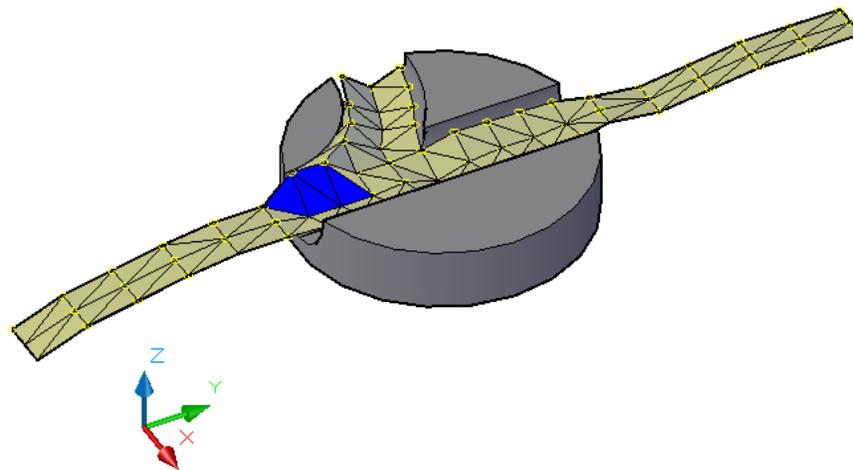
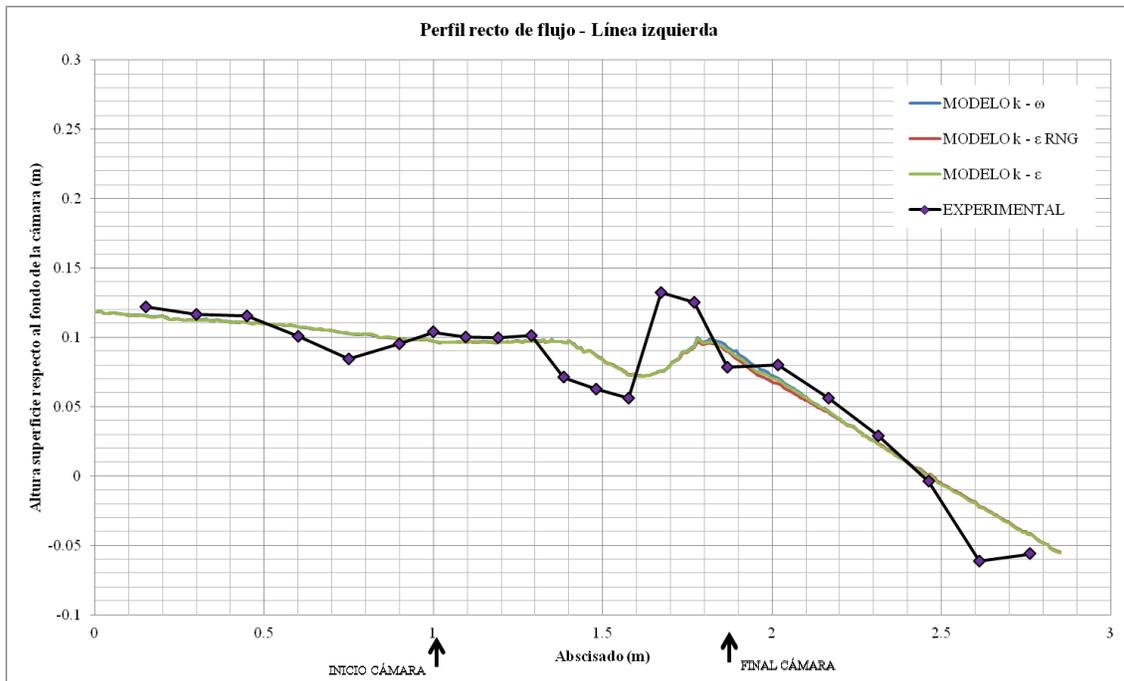


Figura anexa 32: Patrón de flujo tridimensional para FD-8. Tomado de (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).





Gráfica anexa 35: Perfil recto de flujo por línea izquierda para FD-8.

### 7.9. Escenario de modelación FN-7

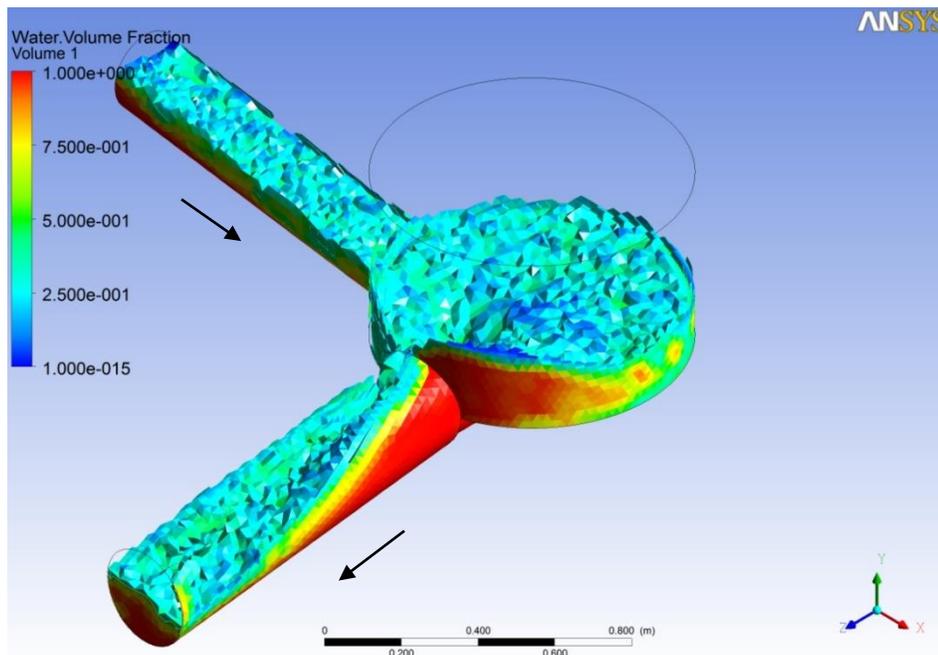


Figura anexa 33: Superficie del flujo en FN-7. Modelo k-ε estándar.

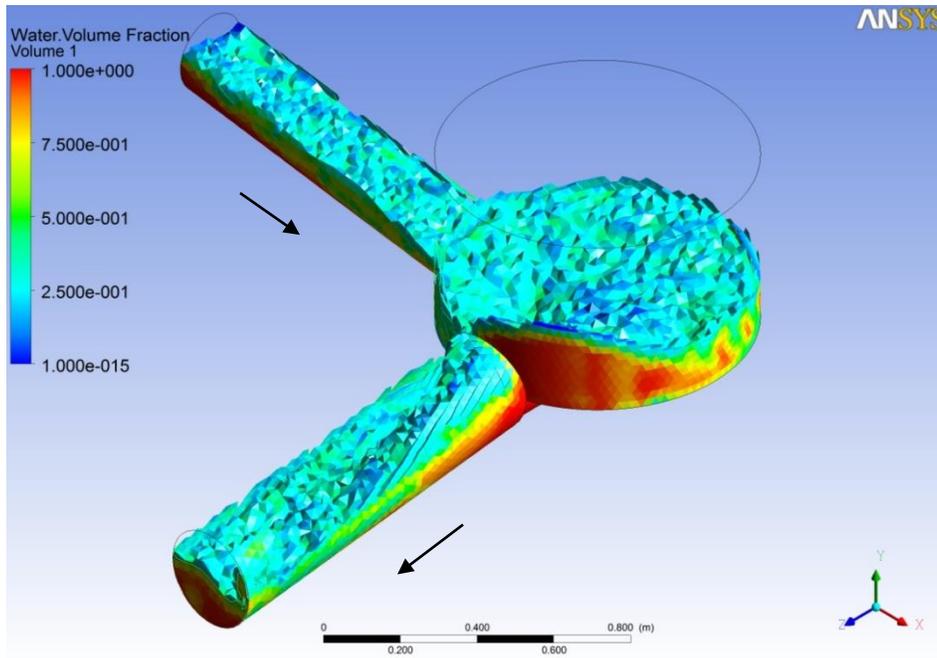


Figura anexa 34: Superficie del flujo en FN-7. Modelo k- $\epsilon$  RNG

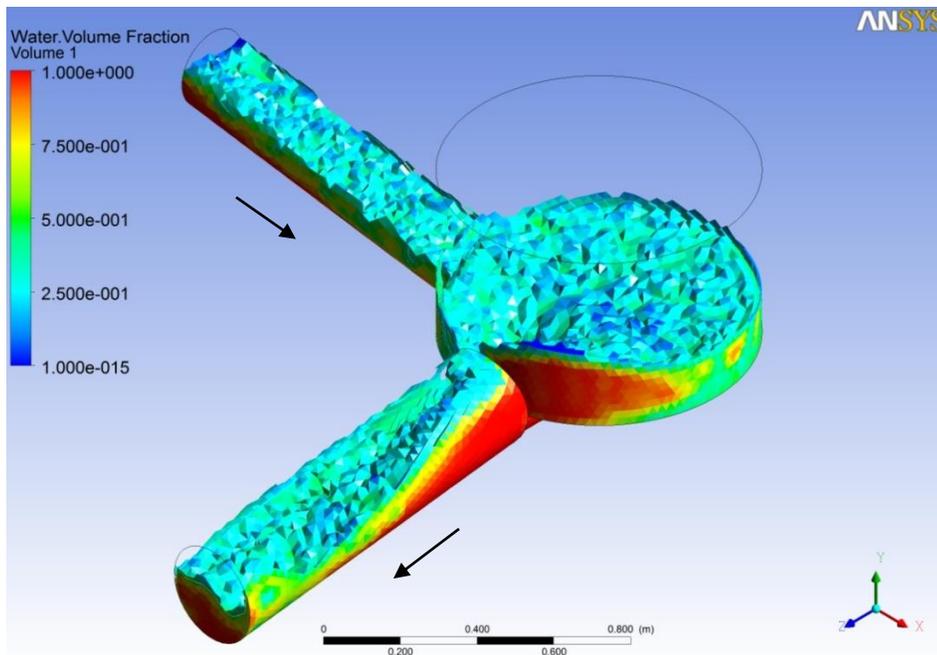


Figura anexa 35: Superficie del flujo en FN-7. Modelo k- $\omega$

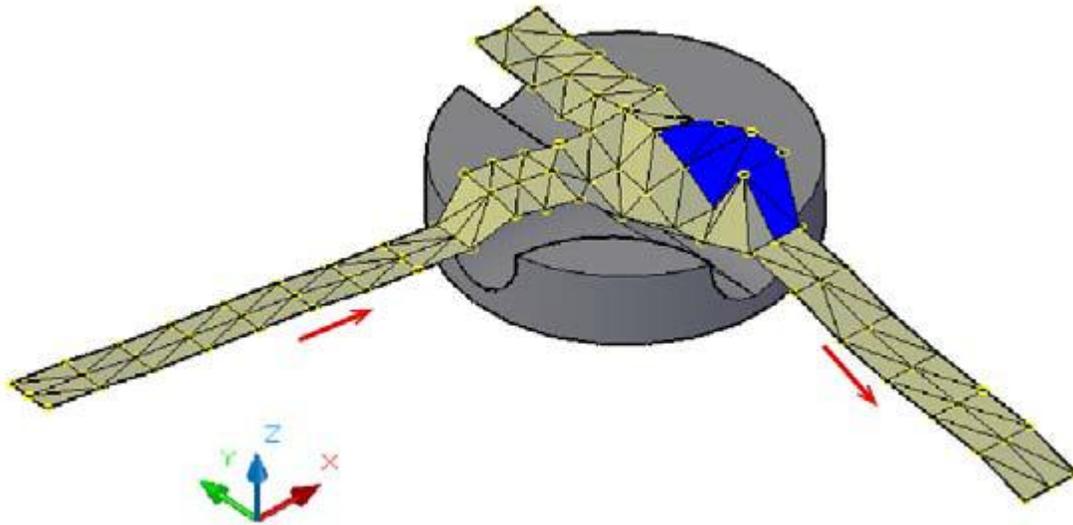
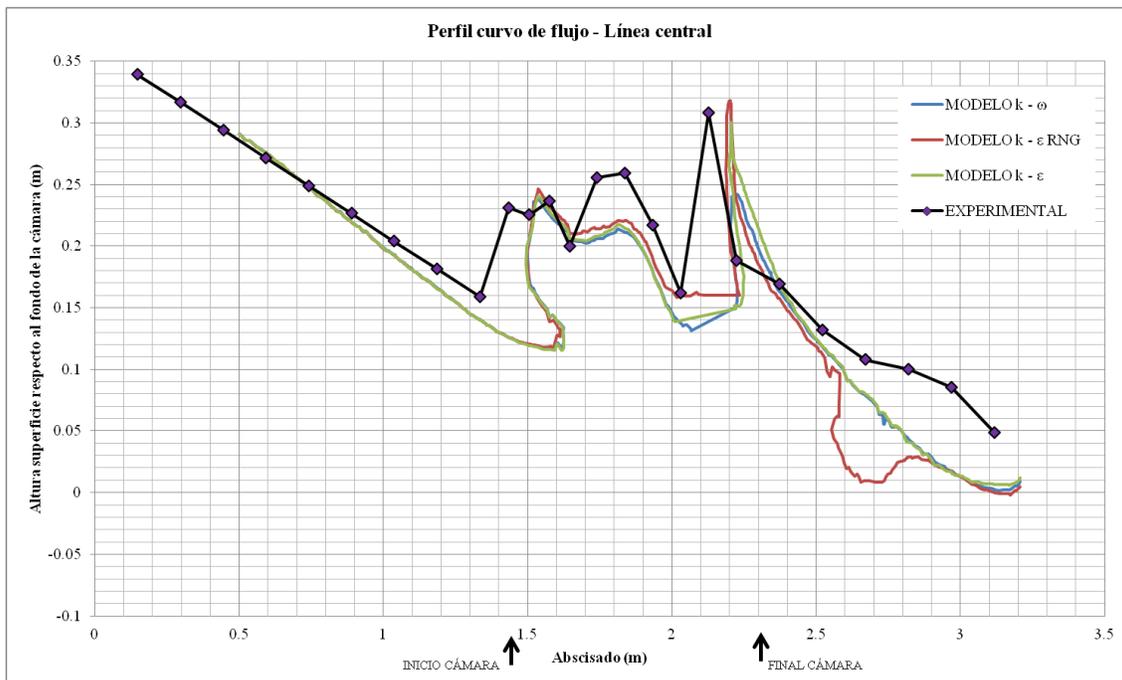
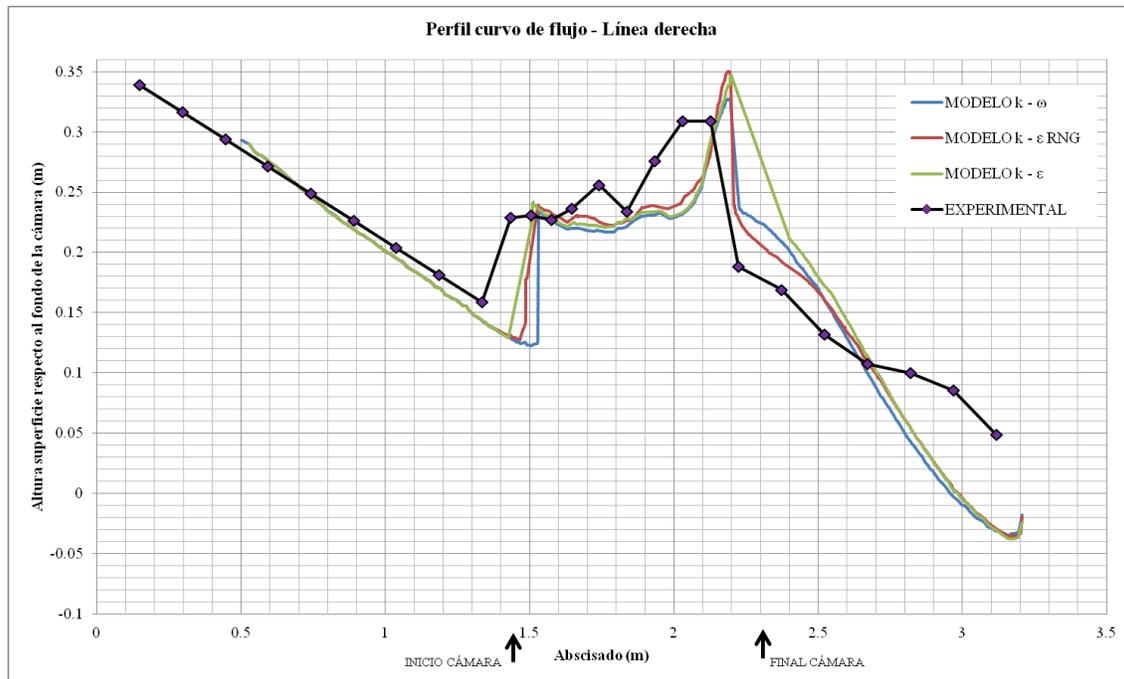


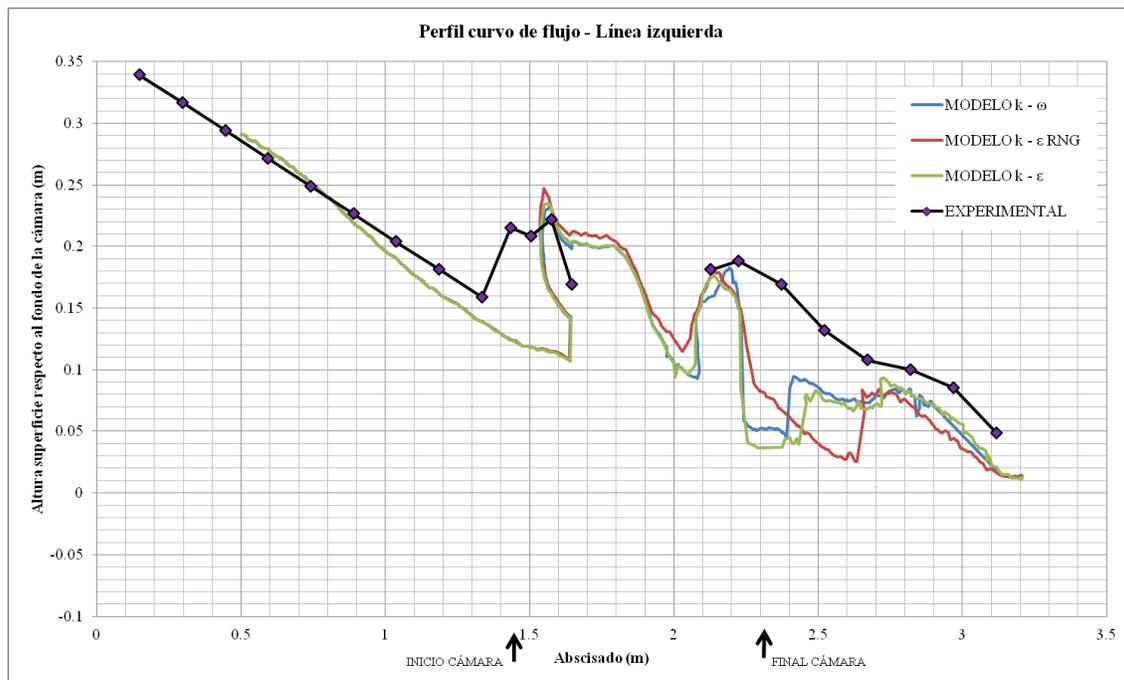
Figura anexa 36: Patrón de flujo tridimensional. Tomado de (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).



Gráfica anexa 36: Perfil curvo de flujo por línea central para FN-7.



Gráfica anexa 37: Perfil curvo de flujo por línea derecha para FN-7.



Gráfica anexa 38: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para FN-7.

## 7.10. Escenario de modelación FN-8

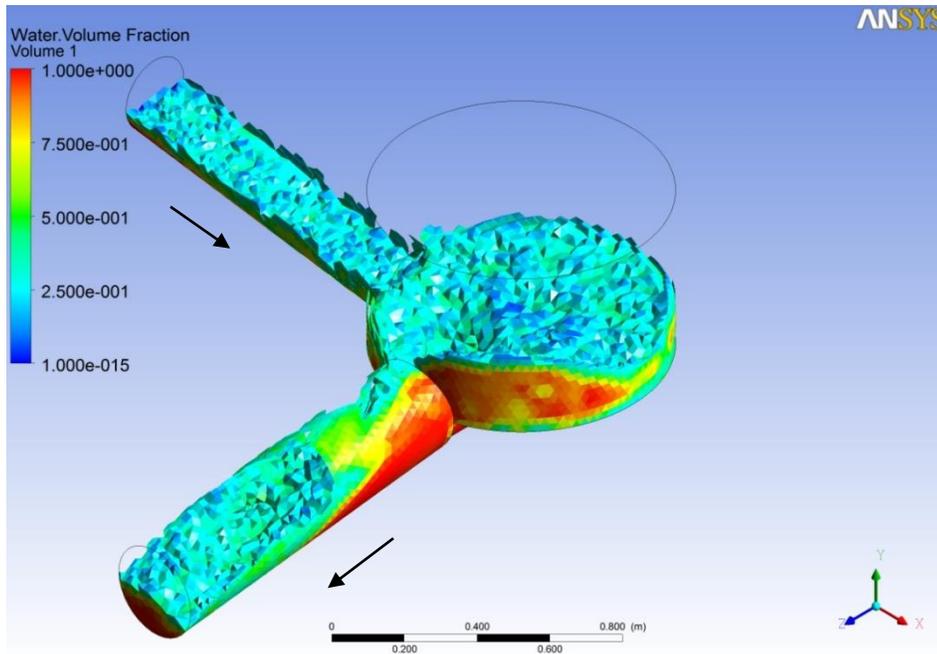


Figura anexa 37: Superficie del flujo en FN-8. Modelo k-ε estándar.

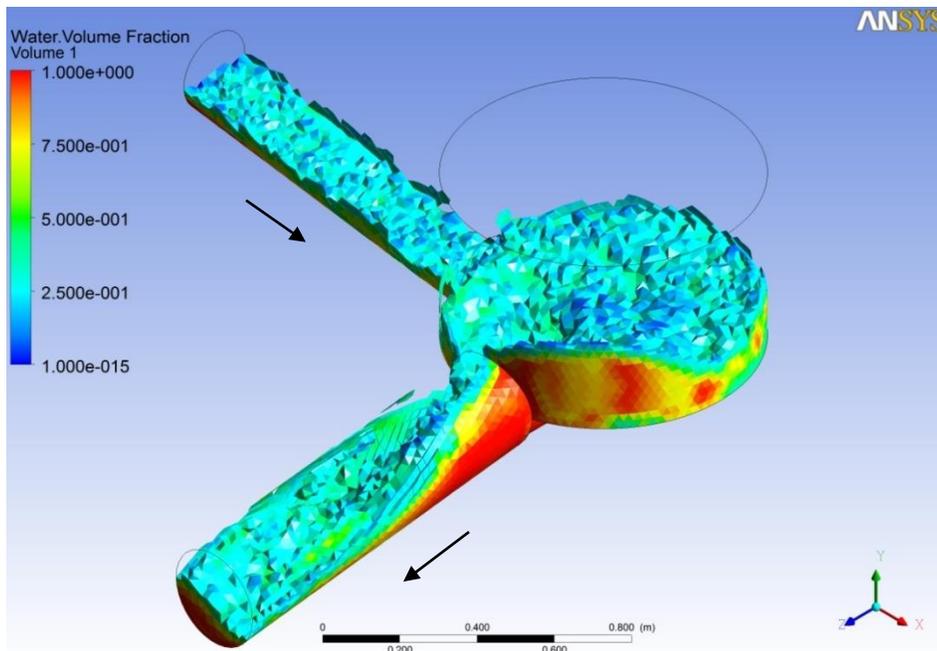


Figura anexa 38: Superficie del flujo en FN-8. Modelo k-ε RNG.

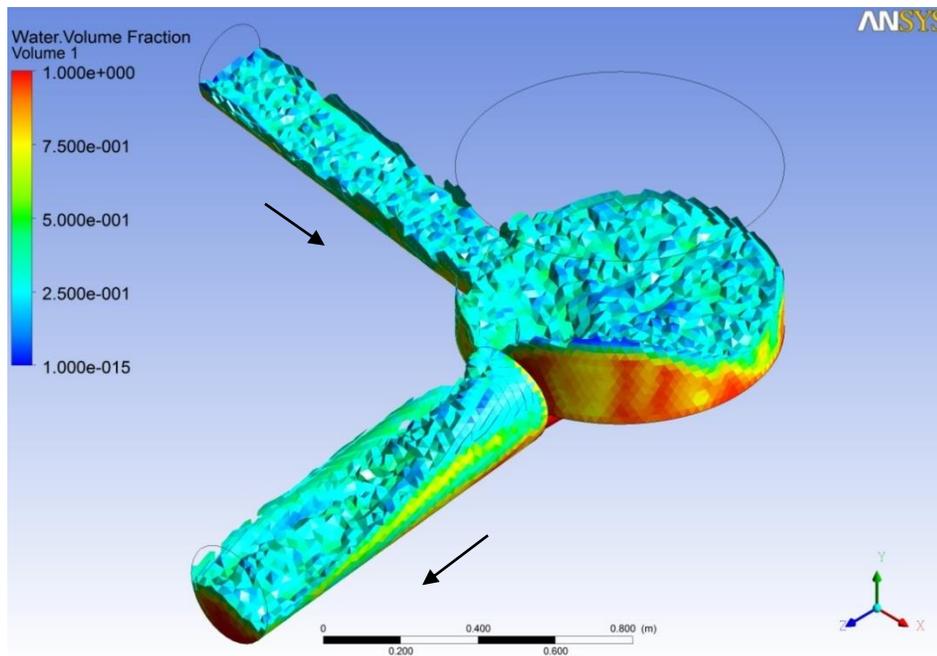


Figura anexa 39: Superficie del flujo en FN-8. Modelo k- $\omega$ .

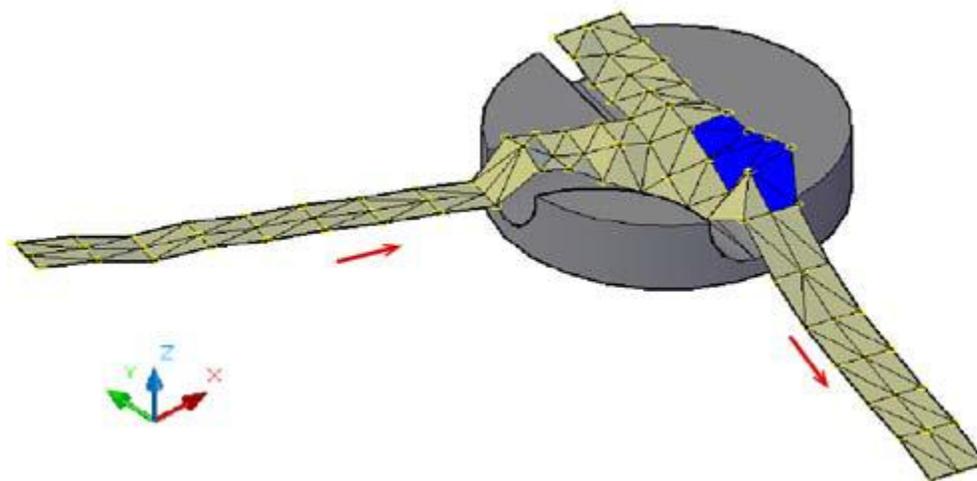
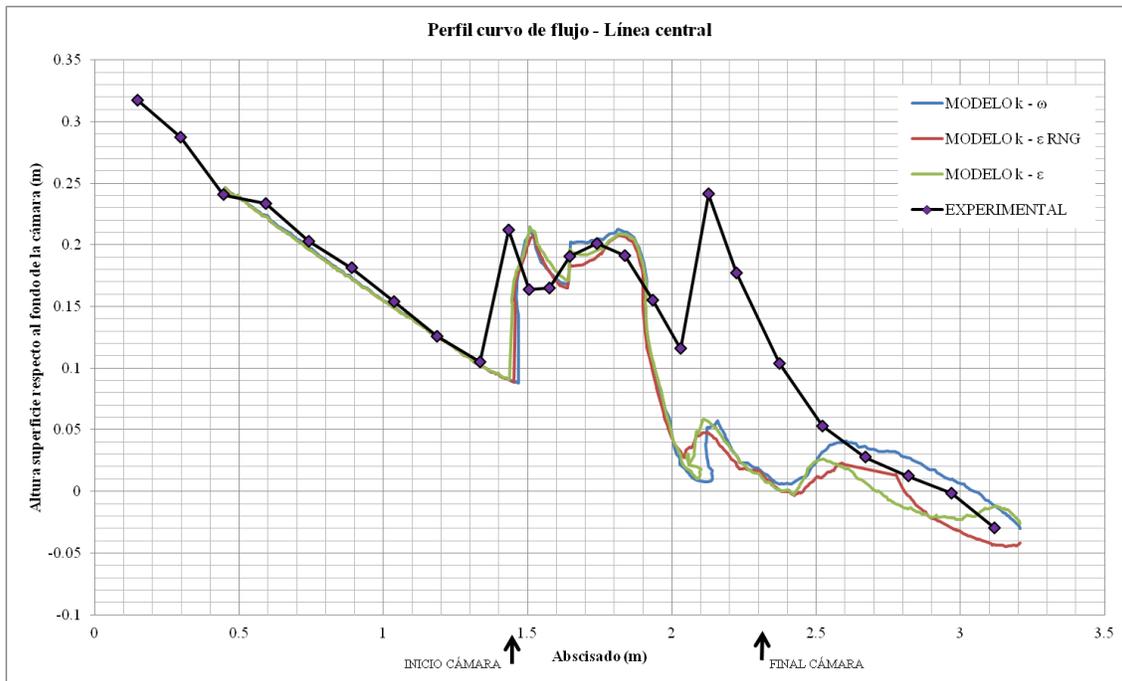
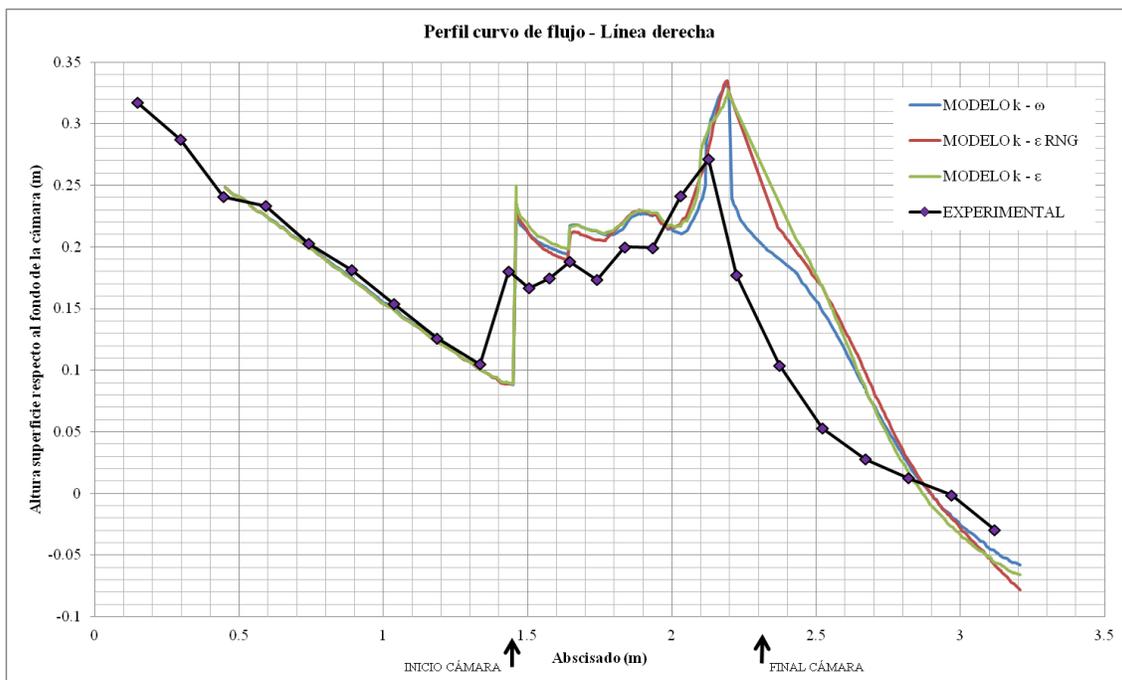


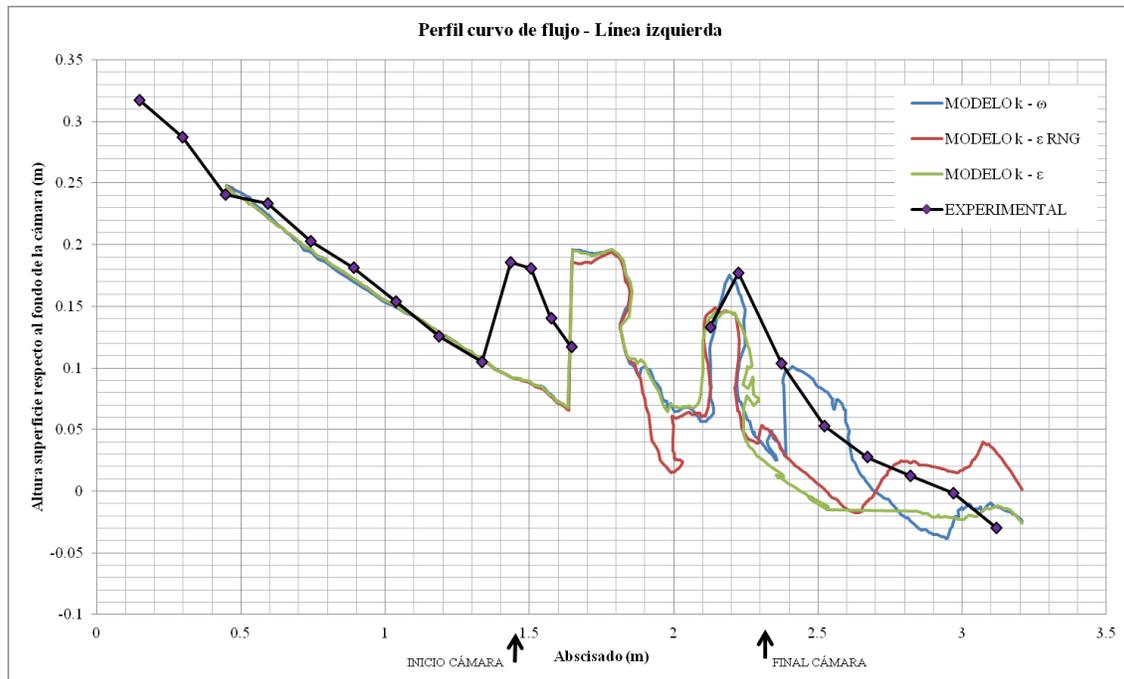
Figura anexa 40: Patrón de flujo tridimensional. Tomado de (Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2010).



Gráfica anexa 39: Perfil curvo de flujo por línea central para FN-8.



Gráfica anexa 40: Perfil curvo de flujo por línea derecha para FN-8.



Gráfica anexa 41: Perfil curvo de flujo por línea izquierda para FN-8.

---

## 8. BIBLIOGRAFÍA

ANSYS Inc. (2010). *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*. Canonsburg, United States.

Cebeci, T. (2004). *Analysis of Turbulent Flows*. Boston, United States: Elsevier.

Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados - CIACUA. (2010). *Comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

H. K. Versteeg, W. M. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*. Harlow, England: Pearson Education Limited.

White, F. M. (2008). *Fluid Mechanics*. New York, United States: McGraw-Hill.

Niño, Yarko. (2002). *Método de los Volúmenes Finitos*. Notas de Clase. Chile. Universidad de Chile.

Panton, R. L. (2005). *Incompressible Flow*. New Jersey, United States: John Wiley & Sons Inc.

Bakker, André. (2002). *Applied Computational Fluid Dynamics, Lecture 18: Eulerian Flow Modeling*. ANSYS Inc.

ANSYS Inc. (2010). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Canonsburg, United States.

White, F. M. (2006). *Viscous Fluid Flow*. Singapore: McGraw-Hill