

**Trabajo Final de Máster
Máster en Mecánica de Fluidos
Computacional**

**Simulación de un flujo de agua a través de un
caudalímetro para sistemas a lámina libre**

Alumno

Ignasi Pruna i Bassa

Director

Josep Anton Ferré Vidal

Universitat Rovira i Virgili
UNIR

Junio 2023

*En record al meu avi Joan Bassa i Recolons
a qui tantes vegades havia observat, magalla en mà, regant l'hort hipnòticament*

Agradecimientos

En primer lugar dar las gracias a Jordi Pujades i Soler, General Manager EMEA de Rubicon Water por su constante apoyo en la realización de este Trabajo. Agradecer también al resto del equipo de Rubicon Water; muy especialmente a Miguel Ramos, por sus consejos, su entusiasmo y su paciencia, a Ekain Urola y a Oriol Crosa, compañeros del Departamento de Hidráulica por su ayuda y a Aniol Ruhí i Eloi Cros, técnicos de campo, por sus explicaciones técnicas y mecánicas. Agradecer también a mi amigo Josep Bové Masmiquel por sus consejos y enseñanzas.

Agradecer también, a mi familia. A mi compañera de viaje Arantxa y a nuestro hijo Blai, que llegó durante la redacción del presente Trabajo y, a pesar de las turbulencias que ha generado en nuestras vidas superando valientemente su complicada intervención quirúrgica, me ha permitido finalizar el presente Trabajo. Agradezco también el apoyo incondicional de mis padres Josep y Montserrat y el de mis hermanas Maria, Montse y Júlia.

Por último, pero no menos importante, agradecer el apoyo de mi director Josep Antón Ferré Vidal de la URV y de mi tutora Mónica Herce Gutiérrez de la UNIR quienes siempre han mostrado una gran flexibilidad y comprensión por el contexto personal en el que he realizado el presente Trabajo, quiero hacer extensivo también este agradecimiento a todo el profesorado del Máster.

Resumen

El presente Trabajo Final de Máster analiza una serie de simulaciones realizadas con el software ANSYS Fluent de una compuerta comercialmente llamada *SlipMeter™*, concretamente el modelo SMB-0450-1200, diseñada por la empresa *Rubicon Water* donde el autor del presente trabajo desempeña sus funciones laborales.

En primer lugar, se contextualiza brevemente y a grandes rasgos la principal tecnología de medición en canales abiertos que más suelen verse en los canales de riego. A continuación, se describe la compuerta objeto del Trabajo.

En segundo lugar, se describen las distintas configuraciones que se han simulado en el presente Trabajo, centrándose principalmente en: Apertura de la compuerta (totalmente abierta, 50 %, 20 % y 10 %), alturas de agua aguas arriba y aguas abajo de la compuerta (energía disponible) y el tipo de flujo aguas arriba de la compuerta (axial o transversal a esta).

En tercer lugar, se describe brevemente el modelo matemático con las ecuaciones gobernantes de conservación de masa y momento y se describen las condiciones iniciales y de contorno de cada Configuración. Se describen también los modelos utilizados en el cálculo numérico de las simulaciones del presente Trabajo.

Finalmente, se exponen los resultados de las simulaciones de cada configuración analizando el comportamiento fluidodinámico en el interior del cajón-caudalímetro y valorando una aproximación de la exactitud en la medida, este análisis permite sacar una serie de conclusiones y propuestas para trabajos futuros.

Palabras clave: Canal, Compuerta, Simulación, CFD, RANS, VOF, Fluidodinámica, Turbulencia, ANSYS Fluent.

Abstract

This Master's thesis analyses a series of simulations carried out with ANSYS Fluent software of a damper commercially called *SlipMeter™*, specifically the model SMB-0450-1200, designed by the company *Rubicon Water* where the author of this thesis is currently working on.

First of all, the main measurement technology in open canals, which is most commonly seen in irrigation canals, is briefly and broadly contextualised. Then, a description of the gate that is the subject of this thesis is given.

Secondly, the different configurations that have been simulated in this thesis are described, focusing mainly on: Gate opening (fully open, 50 %, 20 % and 10 %), water heights upstream and downstream of the gate (available energy) and the type of flow upstream of the gate (axial or transverse to the gate).

Thirdly, the mathematical model with the governing equations of conservation of mass and momentum is briefly described. The initial and boundary conditions of each Configuration are described. The models used in the numerical calculation of the simulations of this work are also described.

Finally, the results of the simulations of each configuration are presented, analysing the fluid dynamic behaviour inside the box-flowmeter and evaluating an approximation of the accuracy of the measurement. This analysis allows to draw conclusions and proposals for future work.

Key words: Canal, Channel, Gate, Simulation, CFD, RANS, VOF, Fluid Dynamics, Turbulence, ANSYS Fluent.

Índice

1. Análisis del contexto	1
2. Estado del arte. Soluciones existentes y objetivos	3
2.1. Sistemas de medición y control más empleados en redes canales abiertos	3
2.1.1. Compuerta - caudalímetro tipo vertedro (<i>overshot</i>)	3
2.1.2. Compuerta tipo guillotina o mural con medición integrada	6
2.1.3. Otras compuertas y mediciones	8
2.2. Rubicon Water TM	12
2.3. ANSYS Fluent (Versión gratuita Estudiante)	13
2.4. Estudios existentes	13
2.5. Objetivos	14
3. Modelo físico. Descripción del equipo hidráulico estudio	14
4. Descripción de las distintas configuraciones	17
4.1. Configuración 1: Compuerta completamente abierta (apertura del 100%)	19
4.1.1. Configuración 1.1: Flujo axial	19
4.1.2. Configuración 1.2: Flujo transversal	19
4.1.3. Configuración 1.3: Flujo axial y caída libre aguas abajo	19
4.2. Configuración 2: Compuerta con apertura del 50%	19
4.2.1. Configuración 2.1: Flujo axial	19
4.2.2. Configuración 2.2: Flujo transversal	19
4.2.3. Configuración 2.3: Flujo transversal y caída libre aguas abajo	20
4.3. Configuración 3: Compuerta con apertura del 10 y 20%	20
4.3.1. Configuración 3.1: Flujo axial	20
4.3.2. Configuración 3.2: Flujo transversal	20
4.4. Resumen de las distintas configuraciones	20
5. Modelo matemático	21
5.1. Ecuaciones de gobierno	21
5.1.1. Conservación de la materia	22
5.1.2. Conservación del momento	22
5.1.3. Conservación de la energía	24
5.2. Flujos Turbulentos	24
5.3. RANS	26
5.4. VOF	29

5.5. Dominio computacional y malla	30
5.6. Condiciones de contorno	33
5.6.1. Flujo axial a la compuerta	33
5.6.2. Flujo transversal a la compuerta	35
5.7. Configuración del <i>software</i> y métodos numéricos de resolución	38
6. Análisis de los resultados	39
6.1. Configuración 1	39
6.1.1. Configuración 1.1	39
6.1.2. Configuración 1.2	42
6.1.3. Configuración 1.3	46
6.2. Configuración 2	50
6.2.1. Configuración 2.1	50
6.2.2. Configuración 2.2	53
6.2.3. Configuración 2.3	56
6.3. Configuración 3	62
6.3.1. Configuración 3.1	62
6.3.2. Configuración 3.2	65
7. Conclusiones y líneas de trabajo futuras	69
7.1. Simulaciones que presentan mayor grado de exactitud	70
7.2. Simulaciones con flujo transversal	72
7.3. Grado de apertura de la compuerta	75
7.4. Líneas de trabajo futuras	75
Referencias	78
A. Anexo A. Bibliografía complementaria. Estudios Existentes	79
B. Anexo B. Código de Matlab ejemplo para la Configuración 1.1	81

Índice de cuadros

1.	Resumen de los principales datos de las distintas configuraciones	21
2.	Resumen de las condiciones de contorno. Flujo axial	34
3.	Resumen de las condiciones de contorno. Flujo transversal	36
4.	Resumen de los datos obtenidos en las simulaciones	69

Índice de figuras

1.	Pérdidas en canales	1
2.	Pérdidas de agua por países	2
3.	Vertedero cresta delgada	4
4.	FlumeGate™	4
5.	FlumeGate™Esquema caída libre o sumergida	5
6.	FlumeGate™instalada en la Emilia-Romaña	6
7.	PikoMeter™y SlipMeter™	7
8.	Slipmeter™. Esquema transductores de ultrasonidos	7
9.	Slipmeter™. Esquema del funcionamiento de la medida de la velocidad	8
10.	Slipmeter™. Instalada y sumergida, vista cenital	8
11.	Esquema compuerta con resalto	9
12.	Canaleta Parshall en <i>Canals d'Urgell</i>	11
13.	Módulo de Máscaras de <i>Ingesur</i>	11
14.	Laboratorio de <i>Rubicon Water</i>	13
15.	Principales cotas de la compuerta	15
16.	Vista tridimensional del modelo físico (1)	16
17.	Vista tridimensional del modelo físico (2)	16
18.	Componentes de la compuerta estudio	17
19.	Esquema general del modelo computacional en CFD-Post	18
20.	Esfuerzos en un elemento fluido. Tensor de esfuerzos	23
21.	Distribución del espectro de energía turbulenta y de la disipación turbulenta (Leschziner,2015)	25
22.	Promediado temporal de la velocidad para dos flujos (Ferziger et al., 2002)	27
23.	Bordes del dominio computacional para la Configuración 2	31
24.	Vista 3D del mallado cartesiano. Configuración 2	32
25.	Corte de la malla en X=0. Plano YZ. Configuración 2	33
26.	Condiciones de contorno para un flujo axial	34
27.	Condiciones de contorno para un flujo transversal	35

28.	Vista 3D de las condiciones de contorno para el flujo axial	37
29.	Vista 3D de las condiciones de contorno para el flujo transversal	37
30.	Perfiles de velocidades. Configuración 1.1	40
31.	Líneas de flujo. Magnitud: velocidad en z (w). Configuración 1.1	41
32.	Contorno de velocidades en el plano ZY, $X=0$. Configuración 1.1	41
33.	Contornos de velocidad en la salida de la compuerta. Configuración 1.1	42
34.	Perfiles de velocidades. Configuración 1.2	44
35.	Líneas de flujo. Magnitud: velocidad en z (w). Configuración 1.2	45
36.	Contorno de velocidades en el plano ZY, $X=0$. Configuración 1.2	45
37.	Contornos de velocidad en la salida de la compuerta. Configuración 1.2	46
38.	Perfiles de velocidades. Configuración 1.3	47
39.	Líneas de flujo. Magnitud: velocidad en z (w). Configuración 1.3	48
40.	Velocidad (w) de la lámina de agua. Configuración 1.3	48
41.	Contorno de velocidades en el plano ZY, $X=0$. Configuración 1.3	49
42.	Contornos de velocidad en la salida de la compuerta. Configuración 1.3	49
43.	Perfiles de velocidades. Configuración 2.1	51
44.	Líneas de flujo. Magnitud: velocidad en z (w). Configuración 2.1	52
45.	Contorno de velocidades en el plano ZY, $X=0$. Configuración 2.1	52
46.	Contornos de velocidad en la salida de la compuerta. Configuración 2.1	53
47.	Perfiles de velocidades. Configuración 2.2	54
48.	Líneas de flujo. Magnitud: velocidad en z (w). Configuración 2.2	55
49.	Contorno de velocidades en el plano ZY, $X=0$. Configuración 2.2	55
50.	Contornos de velocidad en la salida de la compuerta. Configuración 2.2	56
51.	Perfiles de velocidades. Configuración 2.3	58
52.	Líneas de flujo. Magnitud: velocidad en z (w). Configuración 2.3	59
53.	Representación de la velocidad w en la lámina de agua. Configuración 2.3	59
54.	Contorno de velocidades en el plano ZY, $X=0$. Configuración 2.3	60
55.	Contorno de velocidades en el plano ZY, $X=0$. Configuración 2.3	60
56.	Contornos de velocidad en la salida de la compuerta. Configuración 2.3	61
57.	Perfiles de velocidades. Configuración 3.1	63
58.	Líneas de flujo. Magnitud: velocidad en z (w). Configuración 3.1	64
59.	Contorno de velocidades en el plano ZY, $X=0$. Configuración 3.1	64
60.	Contornos de velocidad en la salida de la compuerta. Configuración 3.1	65
61.	Perfiles de velocidades. Configuración 3.2	66
62.	Líneas de flujo. Magnitud: velocidad en z (w). Configuración 3.2	67

63.	Detalle de las líneas de flujo en el interior del cajón-caudalímetro. Magnitud: velocidad en z (w). Configuración 3.2	67
64.	Contorno de velocidades en el plano ZY, X=0. Configuración 3.2	68
65.	Contornos de velocidad en la salida de la compuerta. Configuración 3.2	68
66.	Lámina de agua en el plano YZ para la configuración 1.3	71
67.	Planos XY y ZX sobre los que se representan los vectores de velocidad para la configuración 2.2	73
68.	Representación de los vectores de velocidad en el plano XY para la configuración 2.2	73
69.	Representación de los vectores de velocidad en el plano ZX para la configuración 2.2	74
70.	Instalación de 2 SlipMeter™ en paralelo	75
71.	Compuertas SlipMeter™ operando semisumergidas	76

Glosario

Q	Caudal que fluye por el vertedero	m^3/s
L	Longitud de cresta del vertedero. Longitud característica	m
h	Carga sobre el vertedero o sobre el oficio	m
n	Número de contracciones	$(0, 1 \text{ o } 2)$
C_d	Coefficiente de descarga	adimensional
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
b	Ancho de la compuerta	m
a	Obertura de la compuerta	m
y_1	Calado de agua aguas arriba de la compuerta	m
A_o	Área del orificio	m^2
p	Presión	Pa
t	Tienpo	s
\vec{v}	Vector velocidad	m/s
v_x, v_y, v_z	Campo de velocidad instatáneo en x, y y z	m/s
u, v, w	Campo de velocidad instatáneo en x, y y z	m/s
$\vec{\sigma}$	Tensor de esfuerzos viscosos	Pa
$\rho g \vec{j}$	Fuerzas másicas	N
Re	Número de Reynolds	Adimensional
U	Velocidad	m/s
ν	Viscosidad cinemática	m^2/s

$E(\kappa)$	Energía turbulenta	
Λ	Escala mayor del remolino de un sistema	
η	Escala menor del remolino de un sistema	
μ_t	Viscosidad turbulenta	
k	Energía cinética turbulenta	$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j}$
ρ	Densidad	g/m^3
\dot{x}_y	Masa transferida desde la fase x a la fase y	kg
α_x	Fracción de volumen de la fase x	Adimensional
Fr	Número de Froude	Adimensional

Siglas

<i>TFM</i>	Trabajo Final de Máster
<i>RANS</i>	Reynolds Averaged Navier-Stokes equations
<i>URANS</i>	Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes equations
<i>DNS</i>	Direct Numerical Simulation
<i>LES</i>	Large Eddy Simulation
<i>VOF</i>	Volume Of Fluid

1. Análisis del contexto

El agua es un bien cada vez más escaso y al mismo tiempo más demandado a nivel mundial, con el que cada vez se hace más hincapié en el ahorro y uso eficiente. En Europa, el uso del agua para la agricultura representa un 25 % del total del agua utilizada. A nivel mundial, el uso de agua dulce para la agricultura representa el 70 % del consumo, por lo que mejorar la eficiencia del uso del agua en el sector de la agricultura puede aumentar significativamente la disponibilidad del agua.

A pesar de que actualmente ciertos países gozan de una agricultura muy tecnificada, las redes de canales de agua o redes de distribución, suelen ser infraestructuras antiguas, con un mantenimiento deficiente y sistemas de control obsoletos o sin presencia de ellos.

Se estima que solamente entre el 50 y el 70 % de agua llega a las parcelas demandantes de agua, es decir, que los sistemas de suministro de riego por canal tienen unas pérdidas de entre el 30 y el 50 % del agua. La Figura 1 muestra los orígenes de las pérdidas en los sistemas de canales:

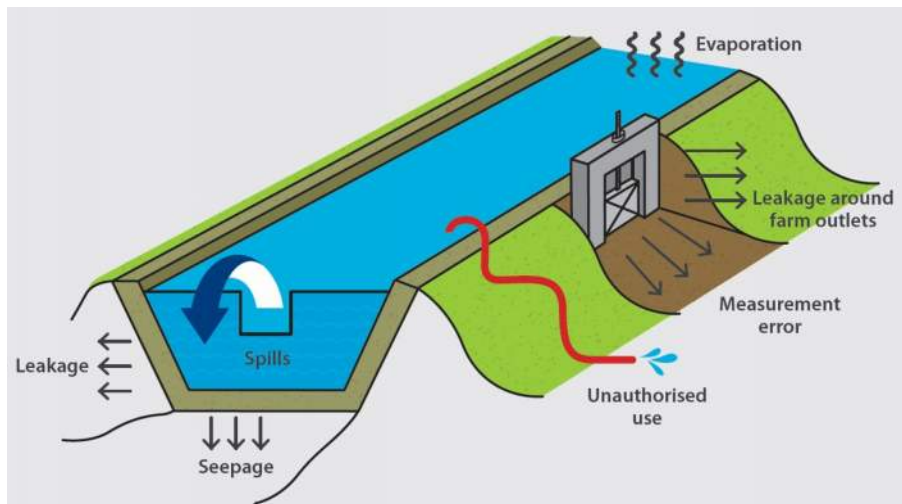


Figura 1: Esquema de los principales tipos de pérdidas de agua en un canal de riego. Fuente: *Rubicon Water*

- Evaporación: Acción directa de la radiación solar que ocurre en todos los sistemas de agua en lámina libre.
- Fugas alrededor de los puntos de suministro: Consecuencia de infraestructuras mal resueltas o de un mal mantenimiento de estas.
- Error de medición: Una baja precisión en la medición en las tomas laterales de un canal también influye en las pérdidas de agua. Normalmente solo se detectan las mediciones incorrectas que entregan menos agua de la concedida ya que el consumidor final alerta a la autoridad competente rápidamente, la

detección de malas mediciones que provocan un exceso de agua entregado no suelen detectarse y es agua entregada innecesaria que sale del sistema y cuenta también como pérdida.

- Uso no autorizado: Extracciones de agua por parte de agentes no autorizados por medios mecánicos ajenos a la infraestructura del canal.
- Fugas y filtraciones: Debido al deterioro de la infraestructura si esta no goza de un correcto mantenimiento.
- Derrames: Se considera que la mayoría de las pérdidas en muchas de las redes de canales son de este tipo, consecuencia de una **mala medición** y control.

En consecuencia, una **medición volumétrica precisa** a lo largo del canal y en las tomas laterales de este junto a un control preciso, conducen a un uso más productivo de las extracciones de agua, y contribuyen a una severa reducción de las pérdidas de agua; **Rubicon Water** en Australia ha participado en decenas de proyectos de modernización de redes de canales las cuales tenían unas pérdidas por derrames de casi el 30 % tal y como se observa en la Figura 2 y, gracias a esta modernización con equipos de medición y control precisos, se lograron disminuir las pérdidas por derrames a un 10 %.

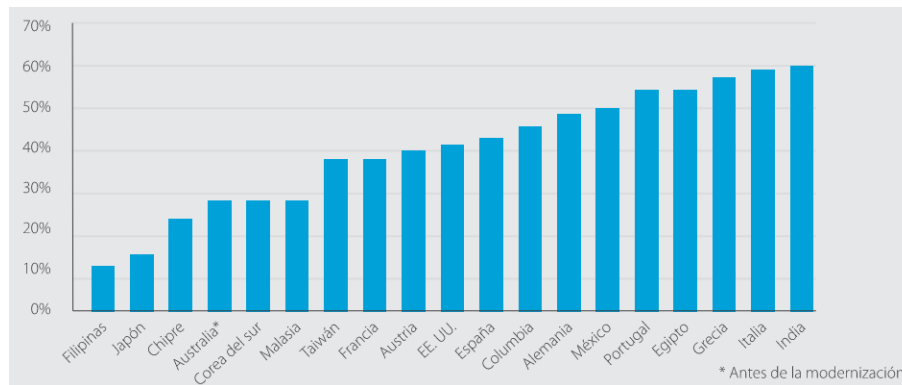


Figura 2: Pérdidas en sistemas de suministro por canales de riego en el mundo. Fuente: *Rubicon Water. Bos, M.G. and Nugteren, J.,(1990)*

Más recientemente, como muestra de las bondades de la modernización y automatización de los sistemas de canales abiertos de riego, **Goulburn-Murray WATER**, culminó su mayor proyecto de riego automatizando 1,725 km de canales abiertos, instalando 9,539 equipos de medición y control, restaurando 310 km de canal y modernizando 7,709 parcelas de riego (Water, 1900). Un organismo auditor independiente certificó en 2020 que el ahorro de agua fue de 416.75 GL (catchments, 2023). Se pretende alcanzar un ahorro de agua de 429 GL, si se logra, se estima que habrá un aumento medio de la eficiencia en el suministro de agua de riego de alrededor del 70-85 %.

Este **Trabajo Final de Máster** se centra en el análisis CFD del agua de riego a través de un modelo concreto de una compuerta mural o guillotina con caudalímetro integrado diseñado por **Rubicon Water**, analizando su sistema de medición y exactitud teórica. Sin embargo, en el siguiente apartado se explicarán brevemente las soluciones existentes más comunes tanto para compuertas tipo vertedero, mural y otros sistemas.

2. Estado del arte. Soluciones existentes y objetivos

En los siguientes apartados se expondrán brevemente los sistemas de medición de caudal más comunes usados en la actualidad, haciendo énfasis en las soluciones desarrolladas por **Rubicon Water**, empresa cuyo autor del presente TFM desempeña sus funciones laborales.

2.1. Sistemas de medición y control más empleados en redes canales abiertos

2.1.1. Compuerta - caudalímetro tipo vertedro (*overshot*)

Estos equipos se basan en la relación matemática de la energía de agua disponible aguas arriba respecto la cresta del canal con el caudal mediante una expresión como la Ecuación 1, que es la forma simplificada para velocidades pequeñas que omiten la energía cinética de la fórmula de vertedero de Bazin ([Dal-Ré Tenreiro y Ayuga Téllez, 2003](#)), que puede verse su forma completa en la Ecuación 2. La Figura 3 muestra un esquema de este tipo de vertederos.

$$Q = C_d(L - 0,1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

$$Q = C_d \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2gL} \left[\left(h + \frac{v_o^2}{2g} \right) - \left(\frac{v_o^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (2)$$

Donde:

- Q = Caudal que fluye por el vertedero, m^3/s
- L = Longitud de cresta del vertedero, m
- h = Carga sobre el vertedero, m
- n = Número de contracciones, $(0, 1 \text{ o } 2)$
- C_d = Coeficiente de descarga
- g = Aceleración de la gravedad, m/s^2
- v = Velocidad de llegada de la corriente inmediatamente aguas arriba del vertedero,

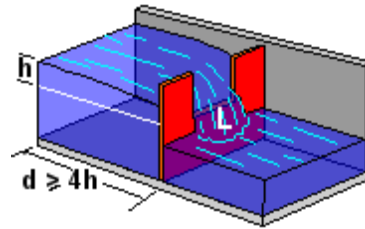


Figura 3: Esquema vertedero cresta delgada. Fuente: *HCANALES, Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica*

Estos vertederos pueden ser fijos o móviles y deben disponer de un sensor aguas arriba para poder relacionar la altura de agua con el canal, son sistemas de medición bastante rudimentarios y de baja precisión. La Ecuación 1 tiene el inconveniente que no se puede aplicar cuando el vertedero trabaja sumergido, es decir, que la cota de la lámina de agua aguas abajo del vertedero está a una cota superior que la cota de cresta del vertedero. Ver la Figura 5, que esquemáticamente muestra la diferencia entre un equipo tipo vertedero sumergido y no sumergido.

Las Ecuaciones disponibles para este tipo de situaciones (vertedero sumergido), son muy variables y algunas tienen como desventaja de ser aplicables solamente en ciertos límites.

Rubicon Water ha desarrollado un modelo de compuerta tipo vertedero basculante llamada *FlumeGate™* disponible en múltiples tamaños para satisfacer la medición y control en distintas condiciones de contorno. La Figura 4 muestra una fotografía de este equipo.



Figura 4: FlumeGate™ compuerta caudalímetro basculante. Fuente: *Rubicon Water*

Esta compuerta caudalímetro dispone de distintos modos de funcionamiento según la finalidad de control; posición fija, mantener caudal constante, mantener nivel aguas arriba, mantener nivel aguas abajo, etc. Consiguiendo una precisión en la medición de caudal del $\pm 2,5\%$ (Various, 2022a).

Este caudalímetro consigue la precisión mencionada gracias a las investigaciones conjuntas de **Rubicon Water** y la **University of Melbourne** que han desarrollado un algoritmo de medición tanto si el vertedero está en condiciones de caída libre como si está sumergido, ver estas diferencias esquemáticamente en la Figura 5. Este algoritmo resuelve las imprecisiones de las Ecuaciones empíricas, sobretudo cuando la compuerta está totalmente sumergida, que en el caso de una compuerta basculante el coeficiente de descarga C_d es un coeficiente que no es fijo debido al cambio de geometría en función de la posición de la compuerta. Este algoritmo consigue relacionar las alturas de agua tanto aguas arriba como aguas abajo y la obertura de la compuerta con el caudal que circula a través de ella.

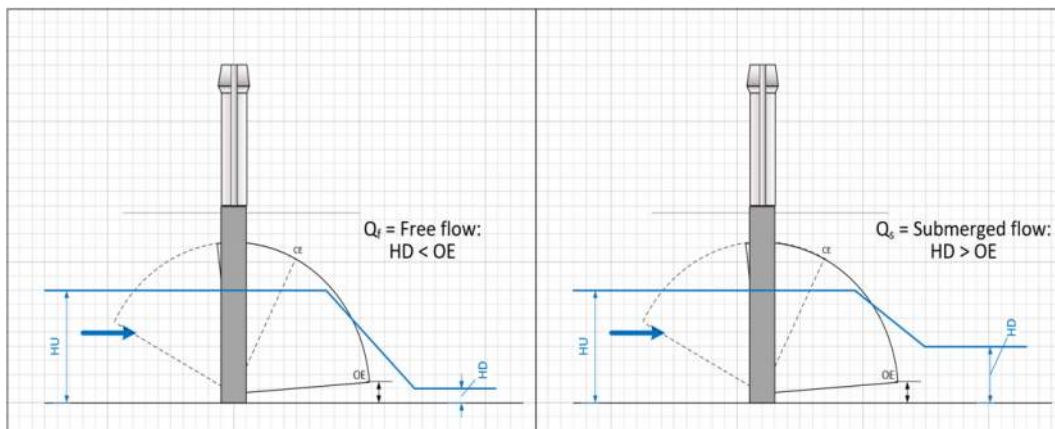


Figura 5: Esquema de FlumeGate™ en caída libre (izquierda) y sumergida (derecha). Fuente: *Rubicon Water*

La Figura 6 muestra uno de estos equipos instalados y funcionando en la zona de la Emilia-Romaña en Italia.



Figura 6: FlumeGate™ instalada en la Emilia-Romaña, Italia. Fuente: *Rubicon Water* e Ignasi Pruna

2.1.2. Compuerta tipo guillotina o mural con medición integrada

Este tipo de compuerta caudalímetro, objeto del presente Trabajo Final de Máster, suele instalarse en las salidas laterales de los canales o tomas. Son dispositivos capaces de entregar el caudal demandado con precisión independiente mente de la energía hidráulica disponible aguas arriba gracias a su auto-regulación. Tienen un diseño "todo en uno.^{en} el que el sistema de accionamiento, control del motor, medición de flujo, fuente de alimentación, teclado de control local y telemetría, funcionan como una sola unidad. La Figura 7 muestra 2 modelos de *Rubicon Water*, *PikoMeter™* y *SlipMeter™* respectivamente, esta última objeto de estudio en el presente trabajo (Various, 2022b).



Figura 7: Compuertas Caudalímetro *PikoMeeter*TM(a) y *SlipMeter*TM. Fuente: *Rubicon Water*

Rubicon Water es la única empresa que ofrece modelos "todo en uno" para salidas laterales cuyo sistema de medida por ultrasonidos *Sonaray*[®] *Flow Measurement Technology* patentada (Various, 2022c), dependiendo del modelo, disponen de hasta 32 transductores ultrasónicos que miden la distribución de velocidad del flujo que circula por el interior del caudalímetro con cinco u ocho planos tal y como muestra en la Figura 8. Estas distribuciones de velocidades de flujo individuales se integran para construir la distribución de velocidad de flujo total circulante por el caudalímetro tal y como refleja la Figura 9.



Figura 8: Esquema de los transductores instalados en el cajón-caudalímetro de una *SlipMeter*TM. Fuente: *Rubicon Water*

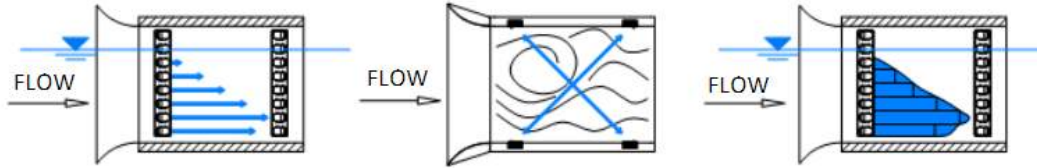


Figura 9: Medida de la tecnología **Sonaray®** en una **SlipMeter™**. Izquierda: corte lateral, líneas en azul, visualización individual de la medida en cada par de transductores. Centro: Corte en planta, líneas en azul, camino cruzado de los sensores. Derecha: Corte lateral, área en azul, visualización del algoritmo sección de caudal. Fuente: *Rubicon Water*

Finalmente, el presente Trabajo Final de Máster, realizará distintas simulaciones para analizar el comportamiento del flujo en el interior de la caja de medición para, entre otros, poder valorar la correcta o mejorable posición de los transductores de ultrasonidos.

La figura 10 muestra un plano zenital de una compuerta **Slipmeter™** instalada en el sistema del Canal del Flumen, Aragón.



Figura 10: Vista cenital de una **SlipMeter™** instalada y en funcionamiento en el sistema del Canal del Flumen, Aragón. Fuente: *Rubicon Water y Regaber*

2.1.3. Otras compuertas y mediciones

Hay otros sistemas de medición que no son tan precisos como los que se han comentado anteriormente para medir y/o calcular el caudal que circula a través del equipo. Normalmente, son compuertas de guillotina o murales actuadas manual o mecánicamente que relacionan las alturas de agua con el caudal, usando la Ecuación 3 es la Ecuación del flujo para compuertas planas o radiales cuando existe un resalto hidráulico aguas abajo, esta expresión es fruto de la aplicación la Ecuación de Bernoulli (Martínez Marín, 2007). Cuando la compuerta está inundada, es decir, la cota de la lámina de agua aguas arriba de la compuerta y la cota de lámina de agua aguas abajo de la compuerta están por encima de la cota de cierre de la compuerta, se

hace una aproximación con la Ecuación 4 que corresponde al Teorema de Torricelli, el cual aplica también la Ecuación de Bernoulli y estudia el flujo de un líquido a través de un orificio.

Para compuertas mural planas o radiales con resalto hidráulico (Dominguez S., 1974):

$$Q = C_d b a \sqrt{2g y_1} \quad (3)$$

Donde:

- Q : Caudal, m^3/s
- C_d : Coeficiente de descarga calculado como

$$C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}}$$

- Donde:
 - C_c : Coeficiente de contracción. Se suele tomar 0.62, adimensional
 - C_v : Coeficiente de velocidad. Se calcula como $0,96 + 0,079 \frac{a}{y}$
- b : Ancho de la compuerta, m
- a : Obertura de la compuerta, m
- y_1 : Tirante aguas arriba de la compuerta, m

Se muestra el esquema de aplicación de la Ecuación 3 en la Figura 11:

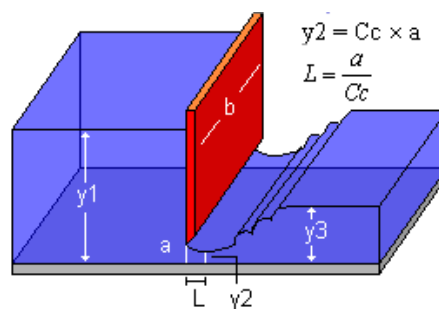


Figura 11: Esquema del resalto hidráulico generado en una compuerta mural o guillotina. Fuente: HCANA-LES, Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica

Para la Ecuación del orificio:

$$Q = C_d A_o \sqrt{2gh} \quad (4)$$

Donde:

- Q : Caudal, m^3/s
- C_d : Coeficiente de descarga. Se toman valores entre 0.60-0.97, adimensional
- A_o : Área del orificio, m^2
- h : Carga sobre el orificio, m

Así que, para poder medir el caudal se necesita conocer la altura de aguas arriba en el primer caso y la diferencia de alturas de agua en el segundo caso para poder relacionarlas con las Ecuaciones mencionadas. Esta medición tiene una presión inferior que los sistemas expuestos en los puntos anteriores. Estos sistemas no suelen ser sistemas integrados en un solo producto y requieren de un desarrollo técnico para obtener el grado de automatización y mecanización deseados.

Otro elemento muy común son los canales o canaletas Parshall que se utilizan para medir los caudales en redes de lámina libre. El canal Parshall acelera el flujo a través de una contracción de las paredes laterales y una caída provocando un cambio de régimen, es decir, un resalto hidráulico con el que una medida de este da un valor de Caudal (Dominguez S., 1974). El diseño de este tipo de canaletas está estandarizado según las normas ASTM D1941, ISO 9826:1992 y JIS B7553-1993.

Una práctica muy habitual aunque poco precisa para la medición y control del caudal en una toma lateral de un canal, es la combinación de una compuerta mural o guillotina motorizada en la toma lateral del canal y una canaleta Parshall aguas abajo de la compuerta, con sensores de nivel instalados que van midiendo las alturas de agua y por ende el caudal y un actuador que da la orden al motor para que adapte el grado de apertura de la compuerta y poder satisfacer el caudal demandado.

La Figura 12 muestra una canaleta Parshall construida en el sistema de *Canals d'Urgell* en la provincia de Lleida.



Figura 12: Canaleta Parshall instalada en el sistema de canales de *Canals d'Urgell*. Fuente: *Rubicon Water* e Ignasi Pruna

No se detallará ni el funcionamiento ni el principio matemático de este tipo de equipos ya que este elemento se aleja de los objetivos de este Trabajo Final de Máster.

Finalmente, otro equipo que se usa mucho en la agricultura para extraer el caudal deseado. Son equipos de caudal determinado a nivel constante, es decir, necesitan un nivel aguas arriba determinado y constante para que el caudal sea regular, tal y como muestra la Figura 13, este sencillo equipo dispone de distintos módulos o máscaras que al levantarlos proporciona un determinado caudal, el caudal de cada uno de ellos se suma pudiendo realizar distintas combinaciones para obtener el caudal deseado.



Figura 13: Módulo de máscaras. Las dos máscaras de la derecha tienen un caudal de 200 L/s cada una. Fuente: *Ingesur*.

2.2. Rubicon Water TM

Rubicon Water, empresa con la que se realiza este Trabajo Final de Máster, se enfoca en la escasez de agua proporcionando soluciones a gobiernos, servicios públicos y agricultores para que aumenten la disponibilidad de agua y la productividad agrícola a través de una mayor eficiencia en el uso del agua, entregando tecnología avanzada a los gerentes de redes de riego alimentadas por gravedad, permitiéndoles gestionar sus recursos hídricos con altos niveles de eficiencia y control.

Rubicon Water tiene su sede en Melbourne, Australia y ha diseñado, construido e instalado más de 30.000 dispositivos de control y medición en sistemas integrados vendidos a más de 180 clientes en 15 países, abarcando una amplia variedad de culturas, organizaciones, topografías y condiciones ambientales. A día de hoy, la tecnología Rubicon está automatizando las operaciones y la gestión de los distritos de riego que abarcan un área de más de 2,5 millones de hectáreas en todo el mundo, apoyando una producción económica anual de más de 17.000 millones de dólares.

Rubicon Water es una empresa comprometida con la investigación, invirtiendo continuamente más del 15 % de sus ingresos anuales en I+D, tanto internamente como en asociación con Universidades como la Universidad del Melbourne, la Universidad del Sur de Queensland en Australia y la Universidad de Tsinghua en China.

La investigación llevada a cabo en el control hidráulico de canales en colaboración con la Universidad de Melbourne ha dado lugar a muchos avances importantes en la medición de flujo y la teoría de control. Estos logros han sido reconocidos por los premios gubernamentales y académicos, incluyendo el prestigioso *Premio Clunies Ross* de la *Academia Australiana de Ciencias Tecnológicas e Ingeniería*. Estos proyectos también han recibido un alto reconocimiento, incluyendo ganar el *Premio a la Excelencia en Ingeniería del Instituto de Ingenieros de Australia para la Infraestructura*.

Disponen de una planta de investigación y desarrollo que incluye el laboratorio de pruebas de flujo hidráulico más grande de su tipo en el hemisferio sur. Es una instalación de 150 m^3 con una capacidad de caudal de $0,8\text{ m}^3/\text{s}$, la instalación replica las condiciones hidráulicas del mundo real experimentadas en los canales de riego y permite a los ingenieros de **Rubicon Water** desarrollar y probar dispositivos de medición y control del flujo.

El laboratorio (ver Figura 14) se asemeja a una gran piscina cubierta y utiliza un suministro de agua de recirculación para proporcionar un flujo constante de agua a través de la compuerta o medidor que se está probando. Un centro de control ubicado dentro del edificio permite analizar datos históricos y en tiempo real utilizando equipos informáticos y se reportan al centro de I+D de **Rubicon Water** en Melbourne.



Figura 14: Laboratorio de *Rubicon Water*. Fuente: *Rubicon Water*

2.3. ANSYS Fluent (Versión gratuita Estudiante)

Para la realización de las simulaciones numéricas del presente Trabajo Final de Máster se ha utilizado el *software ANSYS Fluent*, que utiliza para el cálculo CFD el método de volúmenes finitos. El grupo de programas de la familia ANSYS es una herramienta informática altamente conocida y utilizada tanto a nivel profesional y académico en este tipo de análisis fluidodinámicos.

Cabe destacar que la herramienta gratuita para estudiantes no permite su uso comercial y tiene dos limitaciones cruciales que pueden determinar la tanto la calidad de la simulación como el tiempo de computación ya que, en primer lugar, el número de elementos de malla está limitado a 512.000 elementos y el número de núcleos participantes en la computación está limitado a 4 (ANSYS, 2017) y (ANSYS, 2018).

2.4. Estudios existentes

Se ha realizado una búsqueda de estudios existentes que se asimilen al análisis que se pretende realizar en el presente TFM pero, al analizar un producto exclusivo y patentado por Rubicon Water, no existen otros

equipos en el mercado de características similares, se han en contrado una serie de estudios y artículos que, a pesar de tener interés científico, no pueden integrarse en las Referencias del presente TFM por lo que se añaden como Anexo (Anaxo A) por si es de interés en futuros estudios que puedan partir del presente TFM.

Todos estos estudios, a pesar de tener un claro interés científico no se han contemplado en las Referencias de este TFM ya que ninguno de los artículos expuestos, como se ha mencionado, se ajusta a la geometría de la compuerta estudio.

2.5. Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Máster es analizar la medición a través de simulaciones numéricas computacionales del flujo a través del caudalímetro, para hacerlo se ha escogido un modelo concreto de compuerta: **SMB-0450-1200**, es decir, una compuerta caudalímetro mural tipo *SlipMeter*TM de **Rubicon Water**.

Se analizará el mismo equipo en distintas condiciones de contorno.

Con estas simulaciones se analizará el flujo en el interior del caudalímetro observando los campos de velocidades. Los resultados numéricos pueden aportar una propuesta de rediseño de la ubicación de los transductores o número de transductores. Otro efecto que abordará el presente Trabajo es el comportamiento de la lámina de agua aguas arriba del caudalímetro (depresiones significativas, posibles vórtices, etc.) y cómo afecta la turbulencia o recirculaciones generadas en el interior del cajón-caudalímetro a la lectura del caudal.

3. Modelo físico. Descripción del equipo hidráulico estudio

Tal y como se mencionó en la Introducción y en los Objetivos del presente Trabajo, el equipo hidráulico estudio es la compuerta caudalímetro mural tipo *SlipMeter*TM de **Rubicon Water**, concretamente el modelo **SMB-0450-1200** cuyo cajón-caudalímetro tiene una medida de 450 mm de lado y la máxima altura de agua aguas arriba de la compuerta es de 1.200 mm (medidos desde la parte inferior de la compuerta, no desde la base del canal donde esté instalada). Estas dos medidas se corresponden a las medidas A y B de la Figura 15 respectivamente.

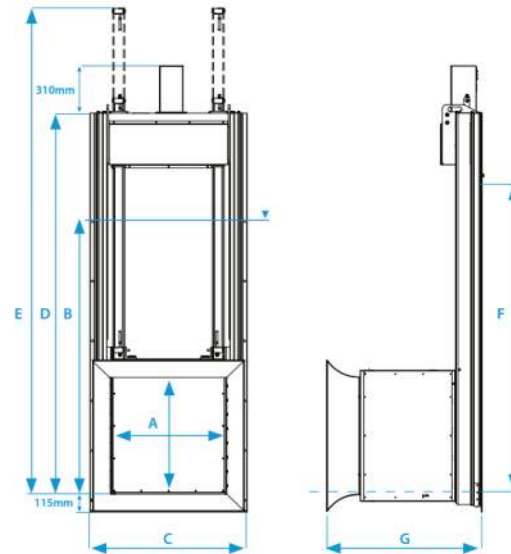


Figura 15: Principales cotas de las compuertas *SlipMeter*TM. Fuente: Rubicon Water

El rango de medidas del cajón caudalímetro de este equipo (*SlipMeter*TM) está comprendido entre los 450 mm y 1500 mm y distintas alturas. El motivo por el que se escoge el modelo estudio **SMB-0450-1200** es que es la compuerta más pequeña del rango de oferta, por lo que hay un ahorro de costos computacionales y, además, al tener un número de elementos de malla limitado por **ANSYS Fluent (versión estudiante)** de 512.000, analizar un modelo más pequeño permite obtener una malla de mayor calidad.

Las figuras 16 y 17 muestran esquemáticamente la disposición principal de las simulaciones estudiadas, cada configuración tiene sus particularidades y condiciones de contorno que se describirán más adelante. Estas figuras muestran el mismo modelo físico desde 2 perspectivas distintas, la primera con el sentido del flujo de derecha a izquierda y, la segunda, con el sentido del flujo de izquierda a derecha. En este modelo no se muestra el grado de apertura de la compuerta ya que será una condición de contorno de cada configuración. La compuerta está adosada a un muro de 300 mm de espesor con un nivel aguas arriba de 1300 mm y un nivel aguas abajo de 1100 mm.

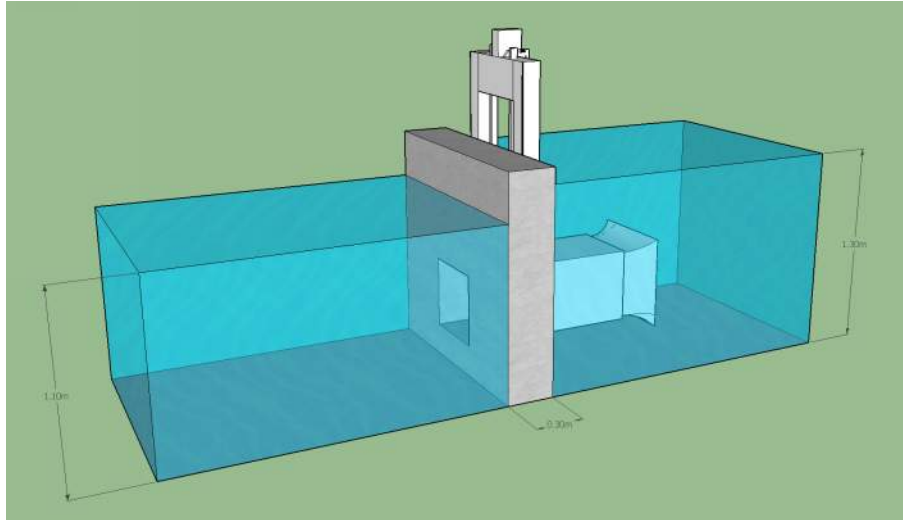


Figura 16: Vista tridimensional del modelo físico. Sentido principal del agua: Derecha a izquierda

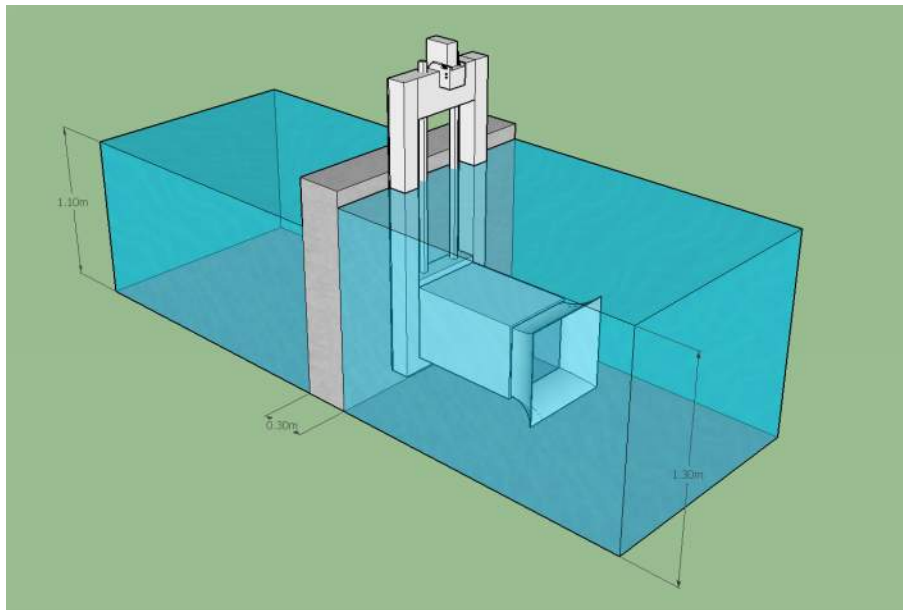


Figura 17: Vista tridimensional del modelo físico. Sentido principal del agua: Izquierda a derecha

La Figura 18 muestra los componentes de las compuertas *SlipMeter*[™]. Algo importante a destacar del modelo físico, que puede llevar a una discrepancia visual con el mallado de cada configuración, es que el elemento número 5 (*Entry Flare*) se ha omitido para facilitar el modelo mallado del modelo, que se ha realizado obteniendo una malla cartesiana. Este elemento evita cierto nivel de turbulencia cuando el agua fluye hacia el interior del cajón cuando las velocidades del flujo principal en el canal son altas, en este Trabajo, estas velocidades, como se verá más adelante en las distintas configuraciones, no alcanzan valores altos (por debajo de 2 m/s).

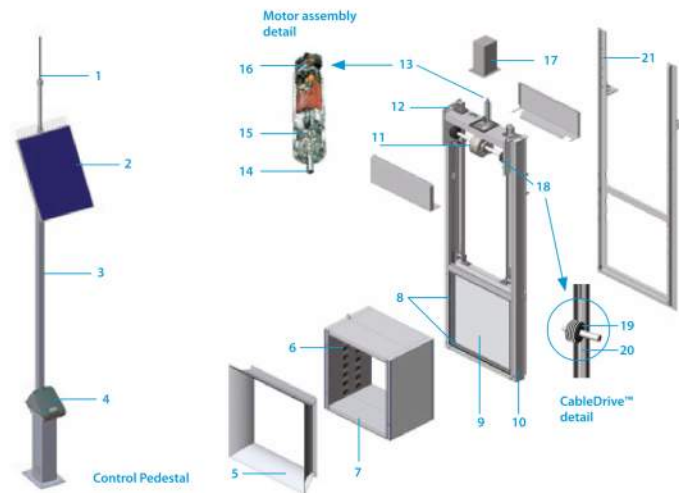
SlipMeter® components**Control Pedestal**

- 1 Antenna
- 2 Solar panel
- 3 Hinged mast
- 4 Secure controller housing with LCD display

Meter/control unit

- 5 Entry flare
- 6 Sonaray sensors
- 7 Meter box
- 8 Gate seals
- 9 Gate panel
- 10 Internal frame (one side houses the optional ultrasonic level sensor)

- 11 Output drive assembly (gear box)
- 12 Lifting hooks
- 13 Motor and encoder
- 14 Motor drive shaft
- 15 Planetary gear box
- 16 Encoder
- 17 Motor cover
- 18 CableDrive assembly
- 19 Cable drum
- 20 Cable guide
- 21 External frame

Figura 18: Componentes de la *SlipMeter*™

El análisis fluidodinámico del presente Trabajo se centra en el comportamiento del fluido en el componente 6, los sensores de ultrasonidos *Sonaray® Flow Measurement Technology*.

4. Descripción de las distintas configuraciones

La Figura 19 representa un modelo general del dominio computacional de las simulaciones a estudiar en el que se muestra el nivel de agua aguas arriba (que en todas las configuraciones es el mismo) y el nivel de agua aguas abajo, además, las líneas representadas en color amarillo muestran el recorrido de los 6 pares de ultrasonidos *Sonaray® Flow Measurement Technology* presentes en el modelo estudio, ya expuestos de forma general en la Figura 8. Estas líneas que se usarán para analizar las simulaciones y la bondad de la lectura teórica del caudal que circula a través de la compuerta, se han enumerado cada uno como PlaXY donde X es el número de camino empezando desde abajo y desde 0 e Y es 0 si es el camino que va de izquierda a derecha o 1 si va de de derecha a izquierda visto aguas arriba. De este modo se obtienen los siguiente 6 niveles de pares de líneas/caminos de parte inferior a superior del cajón-caudalímetro:

- Primer nivel:

Pla00

Pla01

- Segundo nivel:

Pla10

Pla11

- Tercer nivel:

Pla20

Pla21

■ Cuarto nivel:

Pla30

Pla31

■ Quinto nivel:

Pla40

Pla41

■ Sexto nivel:

Pla50

Pla51

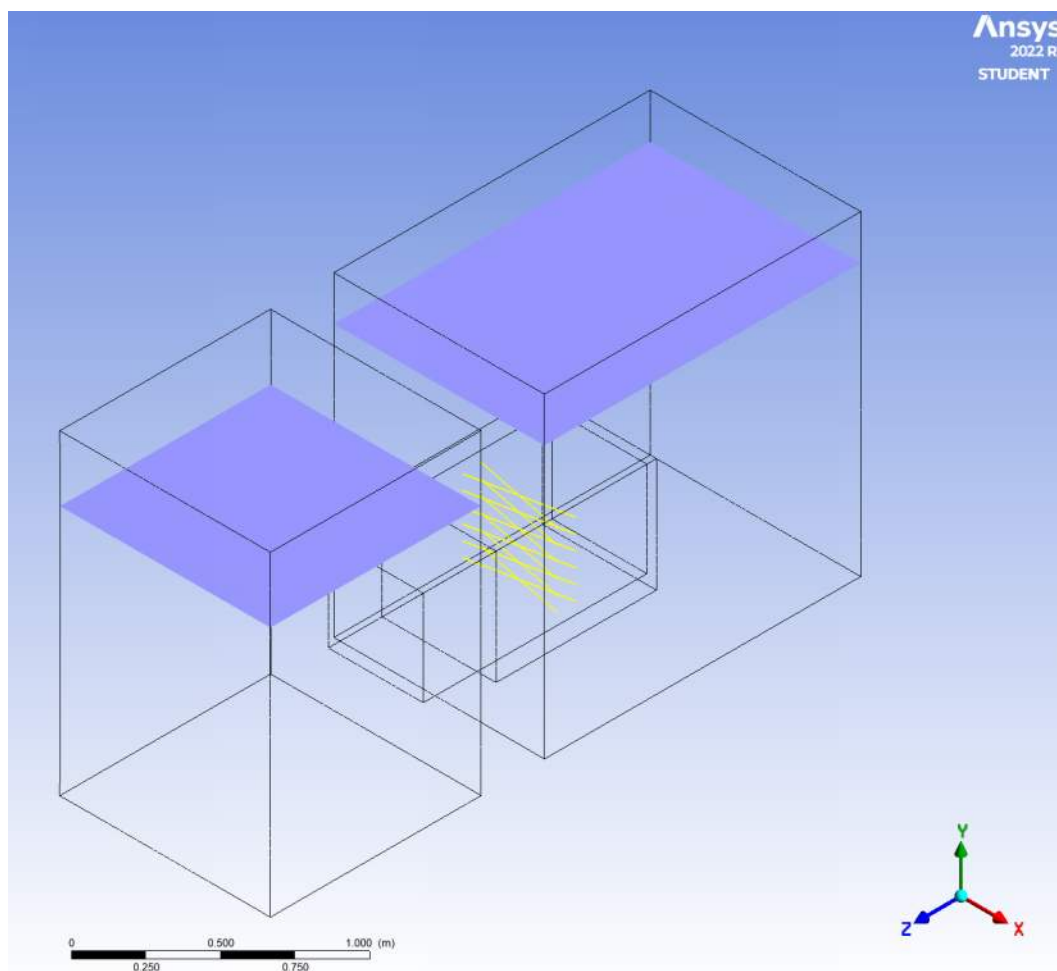


Figura 19: Esquema general del dominio computacional en el CFD-Post de ANSYS representando la lámina de agua (azul) y los caminos de los sensores de ultrasonido (amarillo)

4.1. Configuración 1: Compuerta completamente abierta (apertura del 100 %)

4.1.1. Configuración 1.1: Flujo axial

Esta primera configuración simula un flujo del agua axial a la compuerta, es decir, un flujo constante en el sentido del eje Z de la Figura 19, los niveles de agua son los establecidos anteriormente y la compuerta está completamente abierta.

4.1.2. Configuración 1.2: Flujo transversal

Esta segunda configuración contempla los mismos niveles de agua y el mismo grado de apertura (100 %), la principal diferencia es que el flujo del cauce principal es perpendicular al cajón-caudalímetro de la compuerta, es decir, en el sentido del eje X de la Figura 19.

4.1.3. Configuración 1.3: Flujo axial y caída libre aguas abajo

La tercera configuración difiere únicamente de la Configuración 1.1 en que no se establece un nivel de agua aguas abajo, es decir, se considera que el agua sale del dominio computacional a flujo libre o caída libre, a presión atmosférica.

4.2. Configuración 2: Compuerta con apertura del 50 %

4.2.1. Configuración 2.1: Flujo axial

Esta configuración tiene las mismas consideraciones que la Configuración 1.1; mismos niveles de agua y mismo sentido del flujo, en este caso, la compuerta no está totalmente abierta, sino que tiene un grado de apertura del 50 %, se cierra 240 mm, por lo que hay 230 mm de paso libre de agua. Este valor no se ha establecido en 225 mm ya que se ha realizado en todas las configuraciones un mallado cartesiano del dominio computacional y, dentro del cajón-caudalímetro, como se verá más adelante en este Trabajo, el tamaño de elemento que conforma la malla en el interior del cajón caudalímetro es de 10 mm (1 cm), de esta forma, la cantidad de elementos coincide con las medidas permitiendo realizar el mallado cartesiano. Este redondeo, también se aplica de manera similar a la Configuración 3.

4.2.2. Configuración 2.2: Flujo transversal

Esta quinta configuración contempla los mismos niveles de agua y el mismo grado de apertura (50 %), 230 mm desde la parte inferior del cajón-caudalímetro hasta el borde inferior de la pala de la compuerta y 240 mm desde el borde inferior de la pala de la compuerta hasta la parte superior del cajón-caudalímetro. la principal diferencia, como también ocurre en la Configuración 1, es que el flujo del cauce principal es perpendicular al cajón-caudalímetro de la compuerta, es decir, en el sentido del eje X de la Figura 19.

4.2.3. Configuración 2.3: Flujo transversal y caída libre aguas abajo

La sexta configuración, como la Configuración 1.3, difiere únicamente de la Configuración 2.2 en que no se establece un nivel de agua aguas abajo, es decir, se considera que el agua sale del dominio computacional a flujo libre o caída libre, A presión atmosférica.

4.3. Configuración 3: Compuerta con apertura del 10 y 20 %

4.3.1. Configuración 3.1: Flujo axial

La séptima configuración simula un flujo del agua axial a la compuerta, es decir, un flujo constante en el sentido del eje Z de la Figura 19, los niveles de agua son los establecidos anteriormente y la compuerta, igual que en la anterior configuración, no está completamente abierta, en este caso, el grado de apertura es del 10 %, se cierra 400 mm, por lo que hay 50 mm de paso libre de agua.

4.3.2. Configuración 3.2: Flujo transversal

La octava y última configuración contempla los mismos niveles de agua y el mismo grado de apertura (20 %), 100 mm desde la parte inferior del cajón-caudalímetro hasta el borde inferior de la pala de la compuerta y 400 mm desde el borde inferior de la pala de la compuerta hasta la parte superior del cajón-caudalímetro. la principal diferencia, como también ocurre en la Configuración 1 y Configuración 2, es que el flujo del cauce principal es perpendicular al cajón-caudalímetro de la compuerta, es decir, en el sentido del eje X de la Figura 19.

4.4. Resumen de las distintas configuraciones

El Cuadro 1 muestra un resumen de las principales características de cada una de las 8 configuraciones estudiadas en el presente Trabajo.

Configuración	Nivel	Nivel	% Apertura	Apertura (mm)	Tipo de flujo
	aguas arriba (mm)	aguas abajo (mm)			
1.1	1300	1200	100	450	Axial
1.2	1300	1200	100	450	Transversal
1.3	1300	Caída libre	100	450	Axial
2.1	1300	1100	50	220	Axial
2.2	1300	1100	50	220	Transversal
2.3	1300	Caída libre	50	220	Transversal
3.1	1300	1100	10	50	Axial
3.2	1300	1100	20	100	Transversal

Cuadro 1: Resumen de los principales datos de las distintas configuraciones

5. Modelo matemático

5.1. Ecuaciones de gobierno

La dinámica de fluidos computacional o CFD trata de resolver mediante distintos modelos matemáticos o técnicas de cálculo tres ecuaciones basadas en las leyes físicas de la conservación. Estas leyes son:

- Conservación de la materia:** La masa no se puede crear ni destruir pero sí transformarse, por lo que toda la materia que entra en un sistema sale en la misma cantidad. En el caso de reacciones químicas, que no es el caso del presente Trabajo, la suma de la masa de los reactivos es igual a la suma de la masa de los productos.
- Conservación de la cantidad de movimiento:** Esta es la segunda ley de Newton; el cambio en la cantidad de momento de un fluido es igual a la suma de fuerzas ejercida sobre éste.
- Conservación de la energía:** Esta es la primera ley de la termodinámica en la que un sistema tiene siempre la misma cantidad de energía y cambia si se añade energía desde el exterior.

Así que la CFD se rige por las ecuaciones diferenciales: Conservación de la masa o ecuación de continuidad, conservación del momento o cantidad del movimiento, conservación de la energía.

5.1.1. Conservación de la materia

La Ecuación 5 es la ecuación diferencial de la conservación de la masa o ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (5)$$

En líquidos como el agua, principal componente fluido del presente TFM, así como en gases a baja velocidad, se considera que la densidad es constante, obteniéndose a partir de la Ecuación 5 la condición de incompresibilidad mostrada en la Ecuación 6:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (6)$$

Donde:

- p : Presión
- t : Tiempo
- \vec{v} : Vector velocidad. $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) = (u, v, w)$

5.1.2. Conservación del momento

La Ecuación 7 es la ecuación diferencial de la conservación del momento:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla \cdot \vec{\sigma} - \rho g \vec{j} \quad (7)$$

Donde:

- $\vec{\sigma}$: Tensor de esfuerzos viscosos
- $\rho g \vec{j}$: Fuerzas másicas

El tensor de esfuerzos viscosos aparece en la Ecuación 7 que es un campo derivado de los vectores $d\vec{F}$ (Fuerza de contacto) y \vec{n} (dirección), por lo que tendrá dos índices: el primero referido a la orientación de \vec{n} y el segundo a la componente de la fuerza sobre el plano considerado tal como muestra la Figura 20.

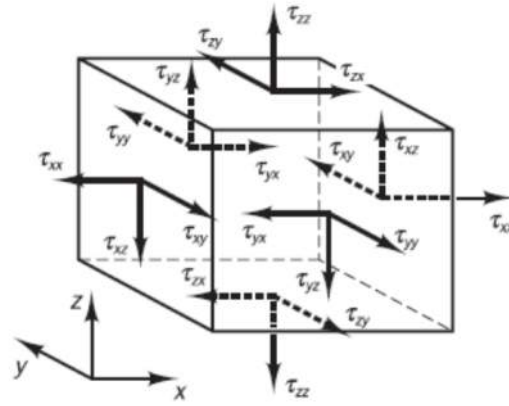


Figura 20: Componentes del tensor de esfuerzos en un elemento fluido (Versteeg y Malalasekera, 1995), Fig 2.3 - p15

Además, este tensor de tensiones es simétrico, es decir, $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ por lo que las componentes diagonales son los esfuerzos normales (σ_i) y las extradiagonales los esfuerzos tangenciales (τ_{ij}), como se observa en la Ecuación 8.

$$\vec{\vec{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (8)$$

Este tensor es indicativo del estado de tensiones en cada punto de un medio continuo, permitiendo el cálculo del esfuerzo en cualquier punto u orientación de la superficie de contacto. Esto se refleja en la Ecuación 9:

$$\vec{f} = \vec{\vec{\sigma}} \cdot \vec{n} = \vec{n} \cdot \vec{\vec{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

Cabe destacar también ue el tensor de presiones ($\vec{\vec{P}}$) es igual al tensor de esfuerzos cambiando de signo como muestra la Ecuación 10:

$$\vec{\vec{P}} = -\vec{\vec{\sigma}} \quad (10)$$

Por último, si el fluido estuviera en reposo, los esfuerzos viscosos son cero y el tensor de esfuerzos se define como la función delta de Kronecker (Ecuación 11):

$$\vec{\sigma} = -p\delta_{ij} \quad (11)$$

Donde δ_{ij} es 1 si $i = j$ y δ_{ij} es 0 cuando $i \neq j$.

5.1.3. Conservación de la energía

La Ecuación 12 es la ecuación diferencial para la conservación de la energía (ε):

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\vec{v}) = -\nabla \cdot (p\vec{v}) - \rho g \vec{j} \cdot \vec{v} \quad (12)$$

5.2. Flujos Turbulentos

Para tener claro si el caso estudio del presente TFM trata un flujo turbulento se debe analizar el número de Reynolds (Re). Este es el parámetro adimensional que se usa para diferenciar entre dos tipos de comportamientos diferenciados del flujo (White, 2021). Re es la proporción entre fuerzas inerciales y viscosas del fluido y se define en la Ecuación 13

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (13)$$

Donde:

- U : Velocidad en m/s
- L : Longitud característica en m
- ν : Viscosidad cinemática del fluido en m^2/s

Se considera:

- Flujo laminar: Cuando las fuerzas viscosas predominan sobre las inerciales.
- Flujo turbulento: Cuando las fuerzas inerciales predominan sobre las viscosas

Según Leschziner, 2016, los flujos laminares se caracterizan por ser un flujo ordenada, con ausencia de vórtices o remolinos y no hay componente de la velocidad normal a la componente principal del fluido, en cambio, los flujos turbulentos, son caóticos y presentan remolinos o vórtices, ambos regidos por las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, si se definen correctamente y de forma precisa las condiciones iniciales para la resolución de las ecuaciones, se puede predecir el comportamiento del flujo (Leschziner, 2016).

Para las simulaciones del presente TFM si se consideran los siguientes valores que definen Re :

- U : 2.00 m/s
- L : 0.45 m
- ν : 1.003e-6 m²/s (viscosidad cinemática del agua a 20°C y a presión atmosférica)

Aplicando los anteriores valores a la Ecuación 13 se obtiene un valor de $Re = 897308$, valor alto que claramente indica que las fuerzas inerciales son mucho mayores que las viscosas; por ende, el flujo presente en las distintas configuraciones ya citadas del presente TFM se trata de un **flujo turbulento**.

Una definición de turbulencia podría ser el conjunto de remolinos o vórtices de diferentes tamaños, velocidades y sentidos de rotación en un flujo. Estos remolinos interactúan entre ellos por el carácter caótico del flujo, esta interacción lleva una reducción del diámetro de los remolinos, por tanto, aumentando su velocidad de rotación (Leschziner, 2016). Para un flujo turbulento completamente desarrollado, la distribución de la energía turbulenta $E(\kappa)$ a lo largo de las escalas tiene un comportamiento universal como muestra la Figura 21 (Leschziner, 2016).

La energía turbulenta se distribuye a lo largo de todas las escalas de remolinos; desde la escala más grande del remolino Λ hasta la más pequeña η , este tamaño menor de remolino en el sistema viene definido por la viscosidad del fluido.

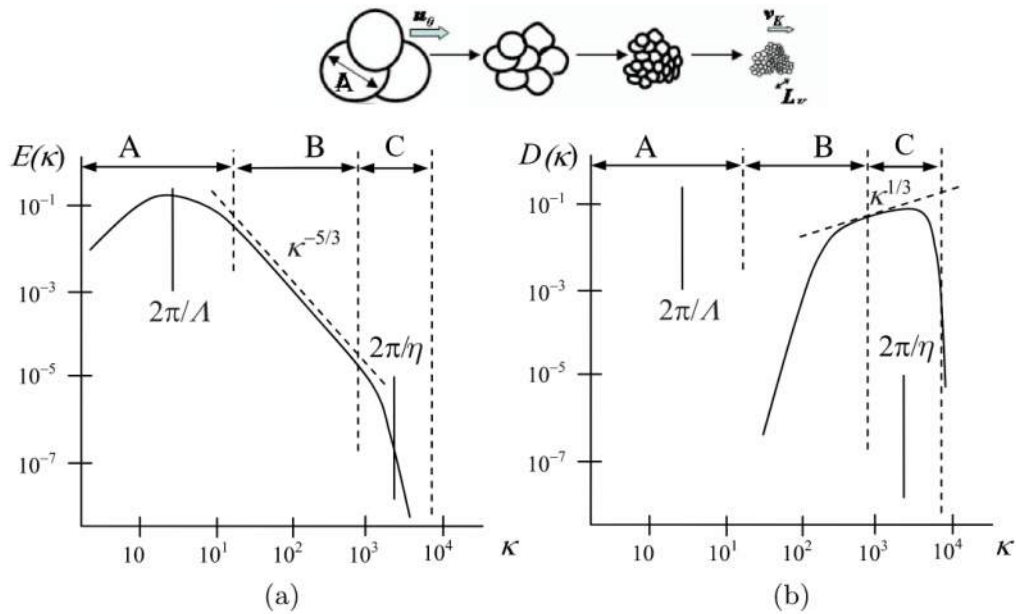


Figura 21: Distribución del espectro de la energía turbulenta $E(\kappa)$ (a) y de la disipación turbulenta $D(\kappa)$ (b) en un flujo plenamente desarrollado y con número de Reynolds Re alto. (Leschziner, 2016), Fig 2.4 - p13

En la Figura 21 se pueden definir tres tramos claramente diferenciados:

- **Zona A:** Donde aparecen los remolines mayores, con una escala de longitud representativa Λ que transportan la mayor parte de la energía. Se extrae energía del campo medio transfiriéndose a las escalas de menor tamaño, este efecto se conoce como cascada turbulenta.
- **Zona B:** También conocido como sub-rango inercial. En esta zona, los remolinos se van fragmentando en remolinos de menor tamaño por la acción de la dilatación del vórtice (Leschziner, 2016). Esta zona no se ve afectada ni por la viscosidad ni por los remolinos de escalas mayores. Esta zona del espectro, la energía turbulenta $E(\kappa)$ es proporcional a $K^{-5/3}$, dando lugar a la conocida función de Kolmogorov (Ecuación 14) que define el espectro de esta zona:

$$E(\kappa) = C_k \varepsilon^{\frac{2}{3}} \kappa^{-\frac{5}{3}} \quad (14)$$

- **Zona C:** La energía se disipa convirtiéndose en calor debido a la viscosidad del fluido (Leschziner, 2016).

5.3. RANS

Para poder resolver matemáticamente un flujo turbulento, se tendría que capturar todo el rango de escalas turbulentas, desde Λ hasta η . Para poder realizarlo se debería emplear la técnica numérica *Direct Numerical Simulation* (DNS), que tienen un elevadísimo coste computacional debido a la alta definición de malla que se precisa haciendo inviable la aplicación de DNS en análisis de Ingeniería Hidráulica. Es por ello que se aplican otro tipo de modelos como el RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*) y URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*) que modelan solamente un rango representativo de las escalas de la turbulencia, haciéndolo práctico y viable a la tecnología de computación actual.

El modelo RANS es poco costoso computacionalmente comparado con un *DNS* o *LES* (*Large Eddy Simulation*). Este modelo parte de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas temporalmente. El método para promediar estas ecuaciones fue propuesto por Osborne Reynolds en 1895 (Launder, 2015) que propuso descomponer la variable instantánea en la suma del valor promedio y las fluctuaciones instantáneas como muestran las Ecuaciones 15 y 16:

$$\phi(x_i, t) = \overline{\phi(x_i)} + \phi'(x_i, t) \quad (15)$$

Donde:

$$\overline{\phi(x_i)} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \phi(x_i, t) dt \quad (16)$$

Donde:

- t : Tiempo
- T : Intervalo de tiempo sobre el que se promedia

La Figura 22 muestra gráficamente la aplicación de las anteriores Ecuaciones 15 y 16 para dos flujos:

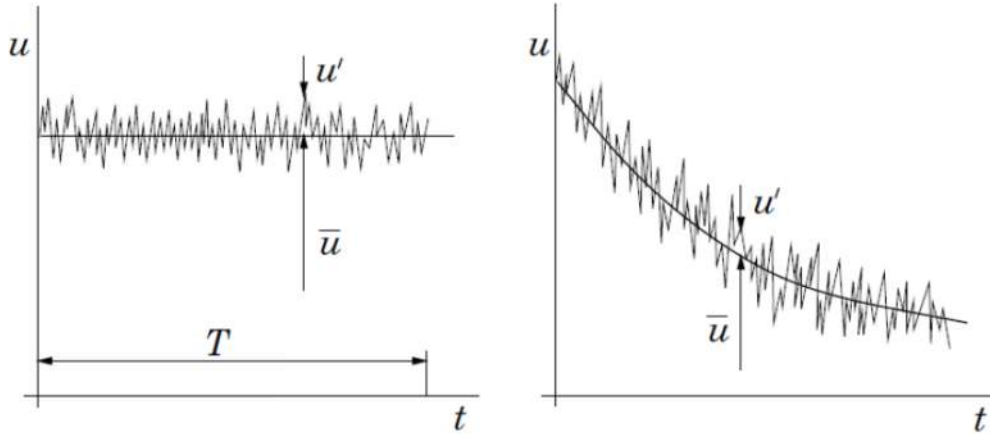


Figura 22: Izquierda: Promediado temporal de la velocidad para un flujo estadísticamente estacionario. Derecha: Promediado temporal de la velocidad para un flujo no estacionario. (Ferziger, 2020), Figura 10.24 - página 397)

Para un estado estacionario en el que se toma un valor de T en la Ecuación 15, las ecuaciones Navier-Stokes y de la conservación son las Ecuaciones 17 y 18:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \rho(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial t} + \frac{\partial \rho(\bar{u}_i + u'_i)(\bar{u}_j + u'_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial(\bar{p} + p')}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{\sigma_{\nu_{ij}}}}{\partial x_j} \quad (18)$$

Donde $\overline{\sigma_{\nu_{ij}}}$ es el tensor viscoso (Ecuación 19):

$$\overline{\sigma_{\nu_{ij}}} = \mu \left(\frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\bar{u}_j + u'_j)}{\partial x_i} \right) \quad (19)$$

Promediando las Ecuaciones 17, 18 y 19, se obtienen las Ecuaciones 20, 21 y 22:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{\sigma_{\nu_{ij}}}}{\partial x_j} \quad (21)$$

$$\overline{\sigma_{\nu_{ij}}} = \mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (22)$$

Teniendo en cuenta que el promedio de la variable fluctuante es $\overline{u_i'} = 0$ y que el promedio del promedio de una variable es igual al promedio de la variable ($\overline{\overline{u_i}} = \overline{u_i}$), se reescribe la Ecuación 21 como la Ecuación 23:

$$\frac{\partial \rho(\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) \quad (23)$$

El último término de la Ecuación 23 ($-\overline{\rho u_i' u_j'}$) se conoce como el tensor de Reynolds que el modelo asume que se aproxima a un incremento de la viscosidad y toma una forma similar a la disipación viscosa (Ferziger et al., 2002) expresándose tal como indica la Ecuación 24:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \sigma_{ij} k \quad (24)$$

Donde:

- μ_t : Viscosidad turbulenta
- k : Energía cinética turbulenta (Ecuación 25):

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (25)$$

Este tensor de Reynolds, como se ha visto en las Ecuaciones 8 y 9 puede también expresarse según la Ecuación 26:

$$\overline{u_i u_j} = \begin{pmatrix} \overline{u_1^2} & \overline{u_1 u_2} & \overline{u_1 u_3} \\ \overline{u_2 u_1} & \overline{u_2^2} & \overline{u_2 u_3} \\ \overline{u_3 u_1} & \overline{u_3 u_2} & \overline{u_3^2} \end{pmatrix} \quad (26)$$

Cabe destacar que los tres componentes extradiagonales del tensor son idénticos a sus respectivos simétricos, es decir, $\overline{u_2 u_1} = \overline{u_1 u_2}$, $\overline{u_1 u_3} = \overline{u_3 u_1}$, $\overline{u_3 u_2} = \overline{u_2 u_3}$. Si uno de los componentes es nulo, por ejemplo $\overline{u_3} = 0$, esto significa que el flujo es estadísticamente bidimensional en (x_1, x_2) , los esfuerzos de cizalla asociados a x_3 desaparecen, es decir, $\overline{u_1 u_3} = \overline{u_3 u_1} = 0$ y $\overline{u_3 u_2} = \overline{u_2 u_3} = 0$. Sin embargo, lo más importante $\overline{u_3^2} \neq 0$ porque cualquier campo de turbulencia, incluso uno sometido a movimiento medio 0 en una dirección (X_3 en este caso), debe tener tres componentes de fluctuación (Leschziner, 2016).

5.4. VOF

Debido a que el presente TFM estudia un flujo de agua a lámina libre, es decir, que el agua está en contacto con el aire a presión de referencia atmosférica, se necesita trabajar con un modelo multifásico que tiene en cuenta más de un fluido (aire y agua en este caso), se usará el modelo VOF (*Volume of Fluid*) (ANSYS, 2017).

El modelo VOF es un modelo multifásico que utiliza las mismas ecuaciones ya expuestas que se usarían en un flujo monofásico, pero en este caso se añade una ecuación de transporte para la fracción volumétrica de una de las fases. Si bien este modelo es sencillo y de menor coste computacional que otros similares (como el modelo de mezcla y el modelo euleriano), se obtienen buenos resultados cuando las fases están claramente separadas como es el caso de este TFM o cualquier caso de Ingeniería Fluvial o Hidráulica.

La ecuación adicional para la fracción de volumen que utiliza ANSYS Fluent es la Ecuación 27; el transporte de las fases se realiza mediante la solución de una ecuación de continuidad para la fracción de volumen de una o más de las fases. Para la fase q^{th} , esta ecuación es:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] \quad (27)$$

Donde:

- \dot{m}_{qp} : Masa transferida desde la fase q a la fase p
- \dot{m}_{pq} : Masa transferida desde la fase p a la fase q
- S_{α_q} : Término fuente (que por defecto es 0 en ANSYS pero puede cambiarse).
- α_q : Fracción de volumen de la fase q

ANSYS Fluent no resolverá la Ecuación 27 para el volumen de fracción de la fase primaria (que en este caso es el aire), la fracción de volumen de la fase primaria se computará teniendo en cuenta que: $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$ (ANSYS, 2017).

Otro aspecto a tener en cuenta es que ANSYS Fluent es capaz de modelar los efectos de los canales a lámina libre usando la formulación del modelo VOF y las condiciones de contorno de un canal abierto. Estos flujos implican la existencia de una lámina de agua o lámina libre entre el agua y el aire. En estos casos, la velocidad de propagación de la ola en la lámina de agua es un termino importante y en canales abiertos se caracteriza por el número adimensional de Froude (Fr) que se define en la Ecuación 28 como la proporción de la fuerza de inercia y la fuerza hidrostática:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (28)$$

Donde:

- V : Velocidad en m/s
- g : Fuerza de la gravedad en m/s^2
- y : Altura de agua, calado o tirante en m

El término del denominador de la Ecuación 28 es la velocidad de propagación de la onda. La velocidad de propagación de la onda (V_w) se define en la Ecuación 29:

$$V_w = V \pm \sqrt{gy} \quad (29)$$

Finalmente, según Fr , los flujos en canales abiertos se pueden clasificar en 3 categorías (Chow, 2009):

- **Supercrítico:** Cuando $Fr > 1$. También llamado régimen torrencial ya que es el que predomina en ríos y torrentes con pendientes altas. Las perturbaciones no pueden viajar aguas arriba del sistema por lo que, en este caso, las condiciones aguas abajo no afectan al flujo aguas arriba.
- **Crítico:** Cuando $Fr = 1$. Las olas que se propagan aguas arriba permanecen quietas. No se suele observar fácilmente en la naturaleza, sí en laboratorios.
- **Subcrítico:** Cuando $Fr < 1$. Las perturbaciones pueden viajar aguas arriba y aguas abajo del sistema. en este caso, las condiciones aguas abajo pueden afectar el flujo aguas arriba.

5.5. Dominio computacional y malla

El Dominio computacional considerado en este Trabajo, al igual que la malla, ha sido establecido teniendo en cuenta las limitaciones del software *ANSYS STUDENT* que permite un máximo de 512 000 elementos en la malla. En este tipo de análisis, son importantes los campos lejanos tanto de entrada como salida, en primer lugar para evitar al máximo las recirculaciones que se producen en los bordes (*Reverse flow*) que provocan problemas en la convergencia de la continuidad, en segundo lugar, sobretudo el campo lejano de la entrada, permite desarrollar el flujo en el eje de circulación y presentarse plenamente desarrollado con el perfil de distribución de velocidades típico en los canales de lámina libre al llegar a la compuerta.

Para las distintas configuraciones presentadas en este Trabajo, considerando el eje z el eje principal de la dirección del flujo de agua (solo en las configuraciones con flujo axial), se ha considerado que el cajón caudalímetro de la compuerta está instalado solidariamente a un muro de 0.30 m de ancho, donde se ubica

también el eje de la compuerta, el ancho de canal considerado es de 1.00 m, una longitud aguas arriba de la compuerta desde plano XY en $z = 0$ hasta el inicio del muro de 1.50 m y 1.00 aguas abajo del muro, es decir, un dominio computacional que tiene un total de $1.50 + 0.30 + 1.00 = 2.80$ m de largo (en el eje Z), 1,50 m de alto (en el eje Y) y un ancho de 1,00 m (en el eje X). El cajón de la compuerta se instala centrado al canal y a 0.20 cm de la solera del canal. La Figura 23 muestra los bordes del dominio computacional descrito para el caso de las Configuraciones 2.x, en las que la compuerta se considera un 50 % abierta.

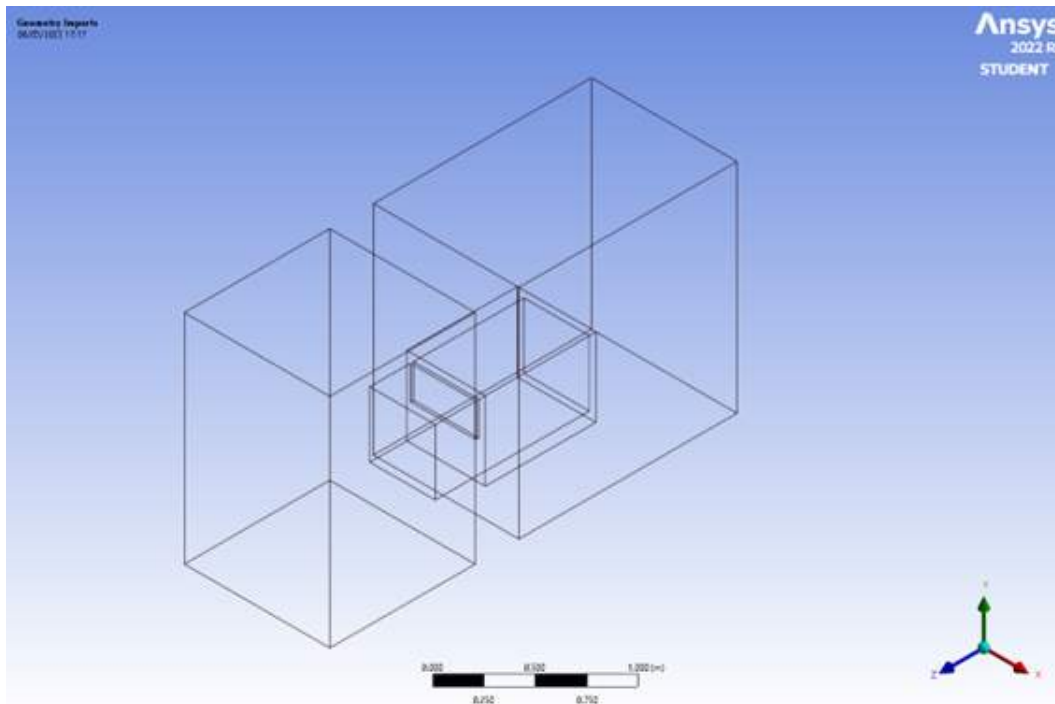


Figura 23: Bordes del dominio computacional para la Configuración 2

La limitación en la cantidad de elementos de malla que impone el software utilizado, hace que no se hayan tomado unas longitudes superiores en las distancias de los campos lejanos (Entrada/*Inlet* y Salida/*Outlet*) a la compuerta, pero esta hecho se considera admisible ya que el objeto del presente trabajo es analizar la fluidodinámica en el interior del cajón independientemente como sea el campo de velocidades de entrada.

El procesado de la malla se ha realizado usando el módulo *Mesh* de *Ansys Fluent* apoyándose en la Guía de tutoriales de Fluent (ANSYS, 2018) y la Guía teórica de Ansys Fluent (ANSYS, 2017).

En el caso de las simulaciones RANS, la medida de los elementos de la malla no depende del Número de Reynolds Re como sí pasa con las simulaciones tipo DNS (*Direct Numerical Simulation*) donde se capturan todas las escalas espaciales y temporales del flujo y las simulaciones LES (*Large Eddy Simulation*), que capturan las escalas más significativas y de mayor tamaño resolviendo numéricamente las ecuaciones de transporte filtradas, aplicando un filtro espacial a las ecuaciones de Navier-Stokes en su versión incompresible.

Aprovechando las características cartesianas del dominio computacional, se ha escogido realizar un mallado del dominio computacional también cartesiano como se observa en la Figura 24, realizando varias pruebas hasta no superar la limitación de elementos disponibles. Se ha realizado un mallado más fino (celdas de 0.01 x 0.01 m) en el interior del cajón-caudalímetro y en las celdas próximas a este (tanto aguas arriba como aguas abajo).

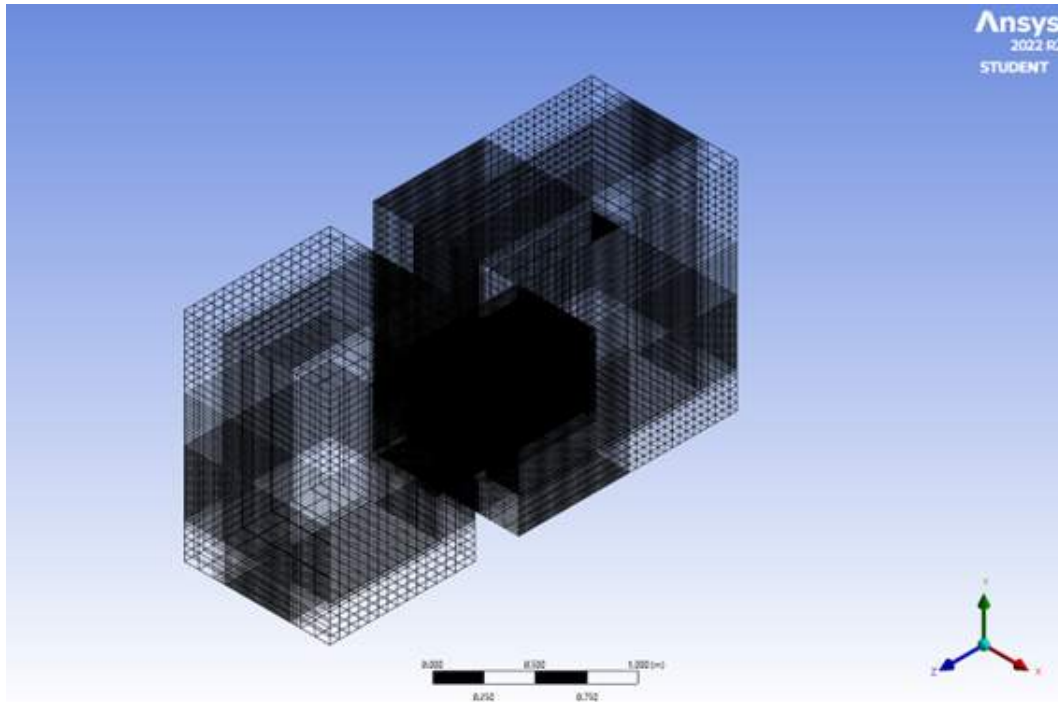


Figura 24: Vista 3D del mallado cartesiano realizado con la herramienta *Mesh* de *Ansys Fluent* para la Configuración 2

La figura 25 muestra un corte en el eje central del dominio computacional donde se pueden diferenciar distintos grados de mallado según la zona del dominio, presentando mayor resolución en el interior del cajón y zonas de aproximación y alejamiento del flujo.

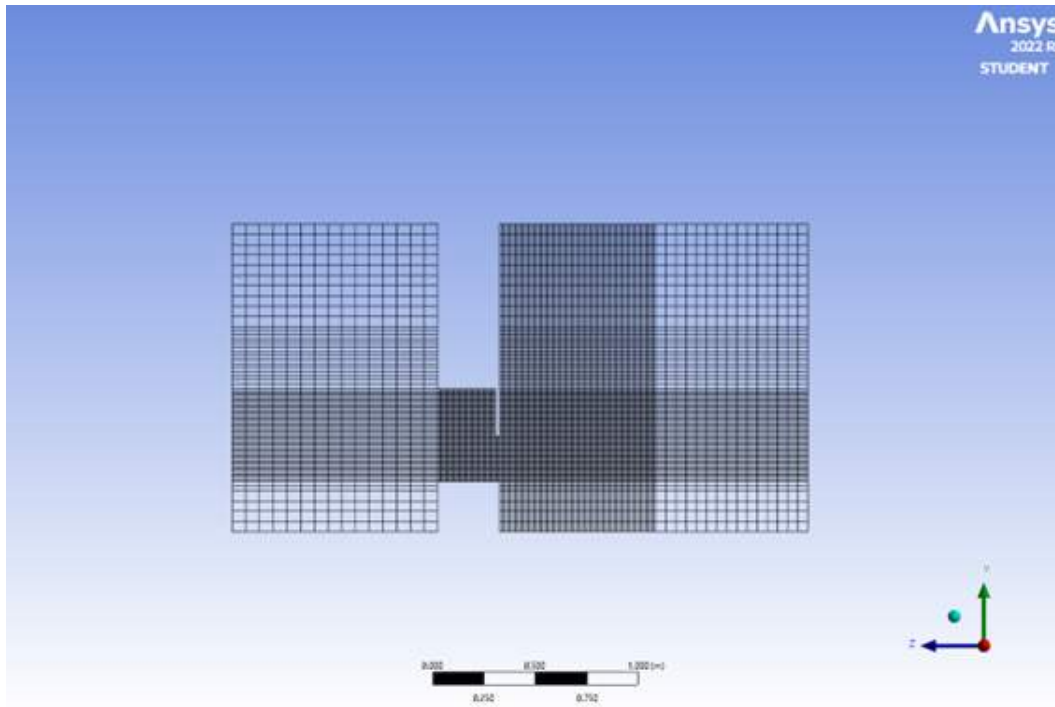


Figura 25: Corte de la malla en $X=0$, plano YZ para la Configuración 2

5.6. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno para cada simulación son muy similares dependiendo si el flujo de entrada es axial o transversal al equipo objeto de estudio y si, en la salida, se impone una altura de agua o es una caída libre.

5.6.1. Flujo axial a la compuerta

Cuando el flujo es axial a la compuerta, se refiere a que el flujo de agua en la entrada circula en la dirección Z y tiene una única salida en la misma dirección.

La Figura 26 muestra las zonas en las que se impone una condición de contorno en *ANSYS Fluent* para un flujo axial a la compuerta.

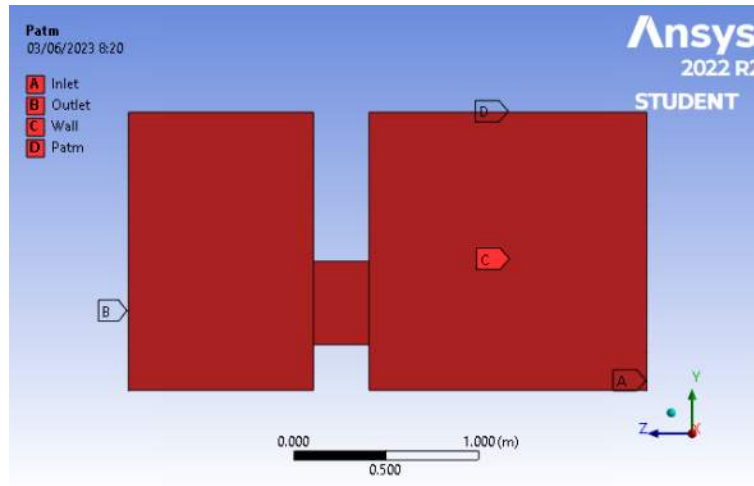


Figura 26: Condiciones de contorno para un flujo axial a la compuerta

Siguiendo el orden que muestra la leyenda de la Figura 26, las condiciones impuestas son las mostradas en el Cuadro 2:

Zona (Figura 26)	Nombre	Condición de contorno
A	Inlet	<i>Pressure Inlet</i>
B	Outlet	<i>Pressure Outlet</i>
C	Wall	<i>Wall</i>
D	Patm	<i>Pressure Outlet</i>

Cuadro 2: Resumen de las condiciones de contorno para el flujo axial

Para la zona A, zona por la que entra todo el flujo en el sistema, se activa la opción *Open Channel* en la pestaña *Multiphase* para poder imponer la altura de lámina de agua en la entrada, que en todas las simulaciones es de 1300 mm como se ha mostrado anteriormente (Ver Cuadro 1).

Las zonas B y D, correspondientes a una condición de salida *Pressure Outlet*, tienen diferencias entre sí ya que, si bien la condición es la misma en términos generales, en la zona B es la única que se activa la opción *Open Channel* ya que es la salida del flujo de agua, imponiendo las alturas de agua ya discutidas y mostradas en el Cuadro 1. Destacar que ambas zonas tienen la misma configuración en las simulaciones 1.3 y 2.3 donde no se impone una altura de agua en la salida ya que, en términos de Ingeniería Hidráulica, se entrega el agua a presión atmosférica considerando que es una caída libre.

Finalmente, para la zona C se considera pared, aquí se incluyen los muros ficticios del sistema y las partes mojadas de la compuerta. Se impone condición de *no slip*, es decir, velocidad nula en pared.

5.6.2. Flujo transversal a la compuerta

Cuando el flujo es transversal a la compuerta, se refiere a que el flujo de agua entra perpendicularmente al dominio computacional, es decir, en dirección al eje Y y tiene dos salidas; la primera, en el mismo eje Y después de circular perpendicularmente al eje del caudalímetro y, la segunda salida, que es la misma que en el caso que el flujo fuera axial a la compuerta, al final del dominio computacional en el eje Z.

La Figura 27 muestra las zonas en las que se impone una condición de contorno en *ANSYS Fluent* para un flujo axial a la compuerta.

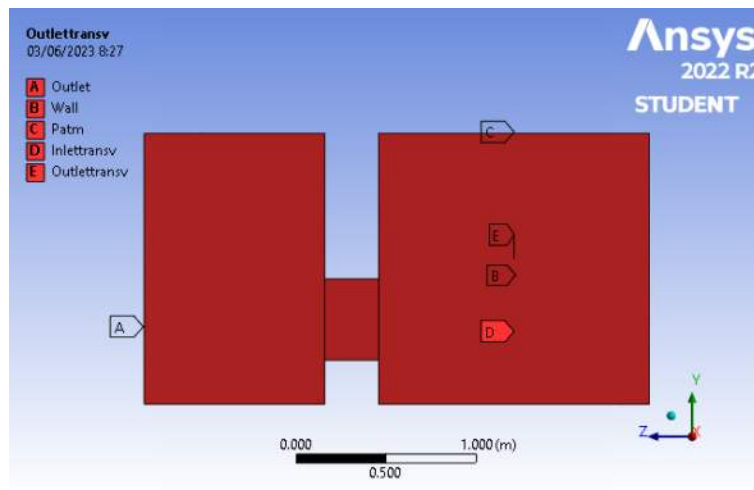


Figura 27: Condiciones de contorno para un flujo transversal o perpendicular a la compuerta

Siguiendo el orden que muestra la leyenda de la Figura 27, las condiciones impuestas son las mostradas en el Cuadro 3:

Zona (Figura 27)	Nombre	Condición de contorno
A	Outlet	<i>Pressure Outlet</i>
B	Wall	<i>Wall</i>
C	Patm	<i>Pressure Outlet</i>
D	Inlettransv	<i>Pressure Inlet</i>
E	Outlettransv	<i>Pressure Outlet</i>

Cuadro 3: Resumen de las condiciones de contorno para el flujo transversal

En este caso, la zona A, zona B en la anterior configuración, tiene las mismas características que la salida del modelo con flujo axial. La zona B, zona C en el anterior caso, también tiene las mismas características que las paredes del modelo con flujo axial aunque, en este caso, el *Inlet* del anterior modelo ahora es una pared y, las paredes transversales aguas arriba, ahora son zonas de entrada y salida de agua. Ver Figuras 28 y 29 para mayor entendimiento. La zona C, zona D en el anterior modelo, tiene las mismas características geométricas y de condición que en el modelo con flujo axial.

La zona D, con una condición de contorno *Pressure Inlet*, será la entrada de flujo para las configuraciones con flujo transversal, se activa la opción *Open Channel* en la pestaña *Multiphase* donde se impone la altura de lámina de agua (1300 mm) y una velocidad del flujo de 1 m/s.

La zona E, con una condición de contorno *Pressure Outlet* también tiene activada la opción *Open Channel* en la pestaña *Multiphase* donde se impone la altura de lámina de agua de salida. En esta configuración hay dos salidas de flujo; zona A (Outlet) y zona E (Outlettransv).

Finalmente, a modo de resumen y para un mayor entendimiento de las condiciones de contorno, las Figuras 28 y 29 muestran gráficamente las condiciones de contorno para el flujo axial y flujo transversal respectivamente. Las zonas coloreadas en tonos grises se corresponden a la condición de contorno *Wall*, en tonos rojos se corresponde a la condición de contorno *Pressure Outlet* y, finalmente, con tonos azulados se corresponde a la condición de contorno *Pressure Inlet*.

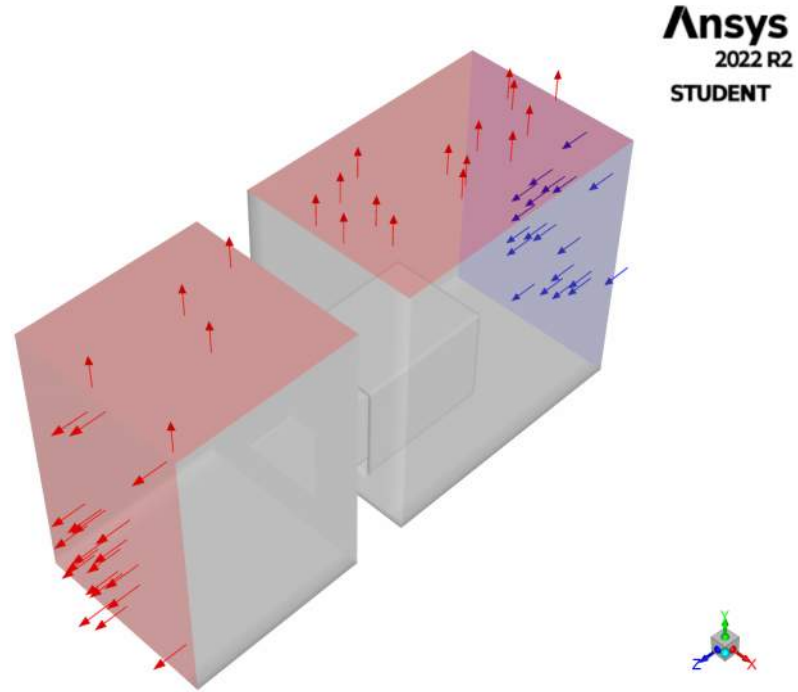


Figura 28: Vista 3D de las condiciones de contorno generada en *ANSYS Fluent* para el flujo axial

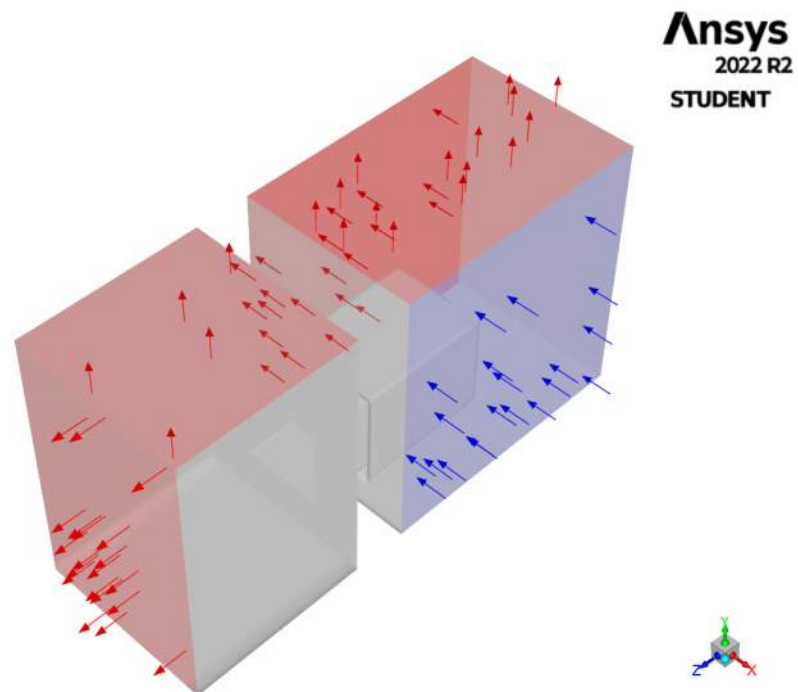


Figura 29: Vista 3D de las condiciones de contorno generada en *ANSYS Fluent* para el flujo transversal

5.7. Configuración del *software* y métodos numéricos de resolución

A continuación se presenta un listado de las principales características de configuración de las simulaciones, común para todas ellas, que se han empleado en el software *Ansys Fluent*. No se pretende describir paso a paso o ofrecer una explicación autocontenida de las simulaciones.

- **Modelo multifásico:** Activado, VOF (*Volume of Fluid*). Formulación implícita i el submodelo *Open Channel Flow* (flujo a canal abierto activado), además, se describen las 2 fases que conformarán la simulación:
 - Fase primaria: Aire
 - $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$
 - $\nu = 1.7894\text{e-}5 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$
 - Fase secundaria: Agua
 - $\rho = 998.200 \text{ kg/m}^3$
 - $\nu = 0.001003 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$
- **Modelo de turbulencia:** $k - \epsilon$ de 2 ecuaciones.
- **Métodos de resolución:** Esquema acoplado con las fracciones de volumen. Se basa en la presión (*Solver-Type-Pressure Based*). Utiliza esquemas *Upwind* de segundo orden para resolver las ecuaciones de conservación.
- **Criterio de convergencia:** Residuales del orden de 10^{-3} .
- **Inicialización:** Se realiza una inicialización estándar, computando desde la entrada (*Inlet* en las configuraciones con flujo axial e *Inlettrans* en las configuraciones con flujo transversal) y un método de inicialización para el submodelo de canal abierto plano (*Flat*). Se inicializa con una fracción de volumen de agua de 1.
- **Cálculo:** Con el criterio de convergencia establecidos y una vez inicializado cada modelo, se realiza un cálculo de un máximo de 2000 iteraciones y un tamaño de paso de tiempo de 0.05 s.

6. Análisis de los resultados

Para cada una de las simulaciones se realiza a continuación el procesado de la magnitud en z de la velocidad (w), se mostrarán algunas capturas de pantalla de las líneas de flujos y contornos de velocidades y, finalmente, se comparará el caudal calculado por ANSYS en cada simulación con el caudal computado fruto de la integración de las velocidades realizado mediante MATLAB (Hahn, 2020). En el Anexo B. Código de Matlab, se muestra como ejemplo el código utilizado para el cálculo de la Configuración 1.1 (el código para las demás configuraciones es el mismo pero con distintos valores de velocidades).

Consultar el Cuadro 1 para ver los principales parámetros de cada Configuración.

6.1. Configuración 1

En esta configuración, la apertura de la compuerta es completa. Es decir, el paso libre del flujo comprende los 450 mm totales de apertura.

6.1.1. Configuración 1.1

Procesados los valores de velocidad en cada uno de los pares de transductores, se representan un perfil de estos mediante MATLAB en la Figura 30.

Se representa también mediante ANSYS Fluent las líneas de flujo desde la entrada de agua hasta la salida representando la magnitud de la velocidad en el eje z como se muestra en la Figura 31. En la Figura 32 se representa también mediante ANSYS Fluent un contorno de las velocidades w y sus isóneas en un corte en el plano ZY en el centro $X=0$ del modelo.

Se representa finalmente en la Figura 33 mediante ANSYS Fluent un contorno de la magnitud de la velocidad en el eje z , computando dentro del entorno del programa el caudal másico.

Todas estas Figuras muestran una distribución muy uniforme del fluido facilitando la medición del caudal, esta configuración se da en instalaciones ideales cuya pérdida de carga no es muy alta (0.10 m en este caso) y las velocidades dentro del cajón-caudalímetro no superan los 2.00 m/s.

Perfil de velocidades en cada par de transductores. Configuración 1.1

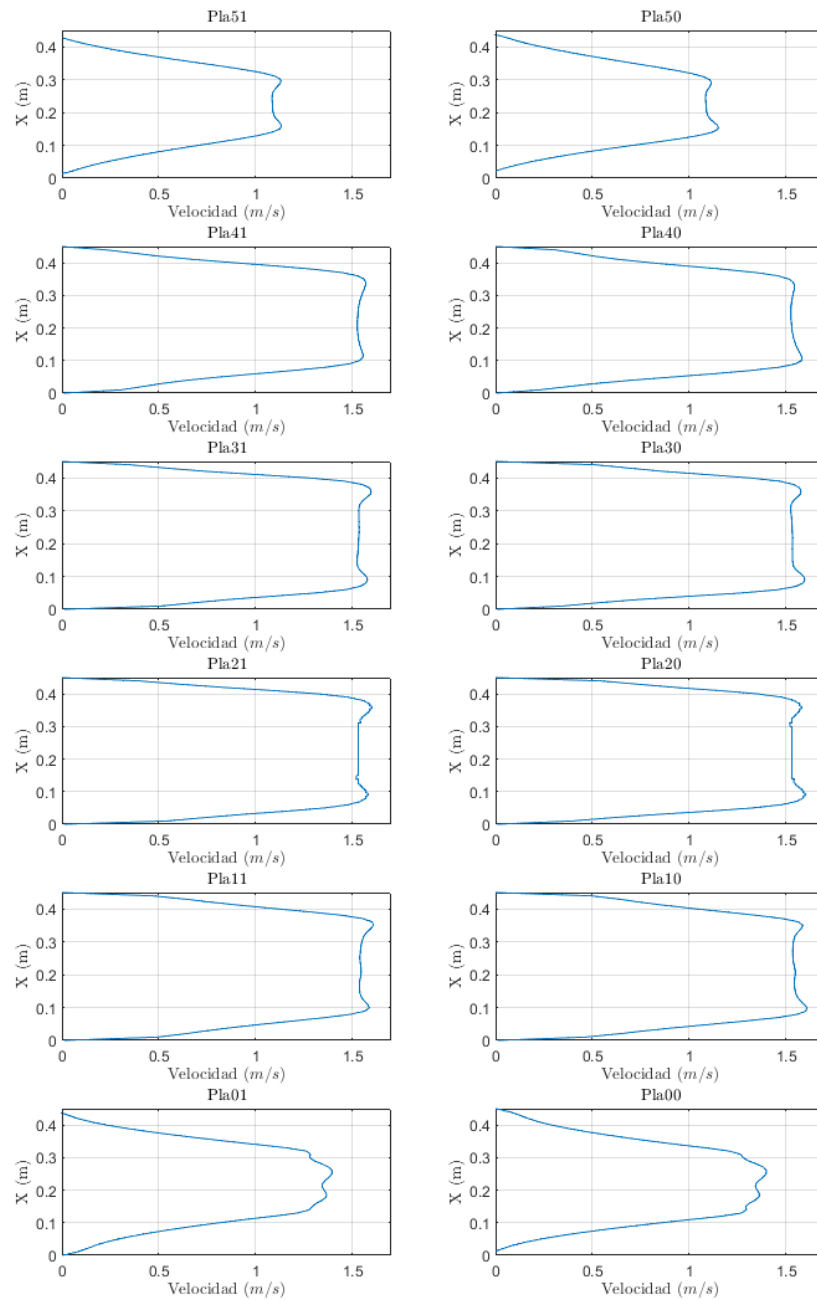


Figura 30: Perfiles de velocidades en cada par de transductores para la Configuración 1.1

Ansys
2022 R2
STUDENT

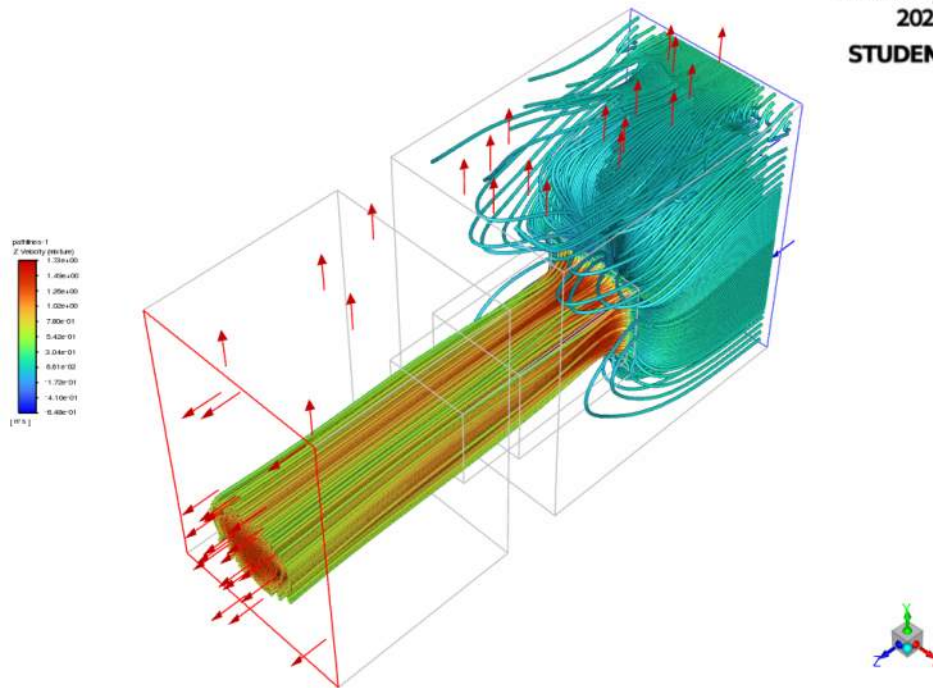


Figura 31: Líneas de Flujo generadas en ANSYS Fluent con magnitud w , velocidad en eje z. Configuración 1.1

Ansys
2022 R2
STUDENT

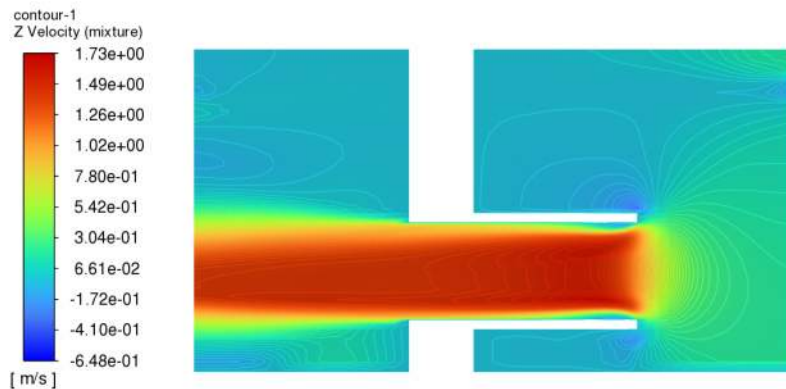


Figura 32: Contorno 2D de velocidad z en el plano ZY generado en ANSYS Fluent. Configuración 1.1

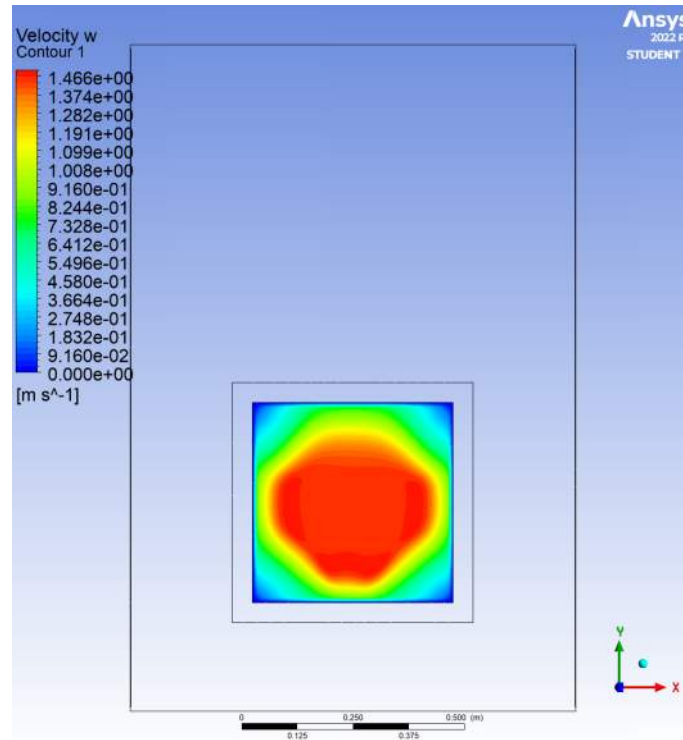


Figura 33: Contorno de velocidades en la compuerta para la configuración 1.1

Se procede a calcular el caudal teórico integrando las medias de velocidad de cada par de transductores en cada plano:

- Caudal calculado en ANSYS Fluent: $0.213\ m^3/s$.
- Caudal calculado integrando las velocidades representadas: $0.211\ m^3/s$.
- Error: $0.002\ m^3/s$.
- Exactitud: $0.94\ \%$

6.1.2. Configuración 1.2

Procesados los valores de velocidad en cada uno de los pares de transductores, se representa un perfil de estos mediante MATLAB en la Figura 34. En este caso, al formarse un vórtice dentro del cajón-caudalímetro, los valores negativos de velocidad en el eje z toman importancia por lo que también se representan en la Figura.

Se representa también mediante ANSYS Fluent las líneas de flujo en sentido reverso desde la salida aguas abajo de la compuerta hasta la entrada lateral representando la magnitud de la velocidad en el eje z como se muestra en la Figura 35. Se observa claramente la formación de una estructura vortical dentro del cajón

del equipo. En la Figura 36 se representa también mediante ANSYS Fluent, un corte en el plano ZY en el centro $X=0$ del modelo.

Finalmente, se representa también en la Figura 37 mediante ANSYS Fluent un contorno de la magnitud de la velocidad en el eje z, computando dentro del entorno del programa el caudal másico.

Perfil de velocidades en cada par de transductores. Configuración 1.2

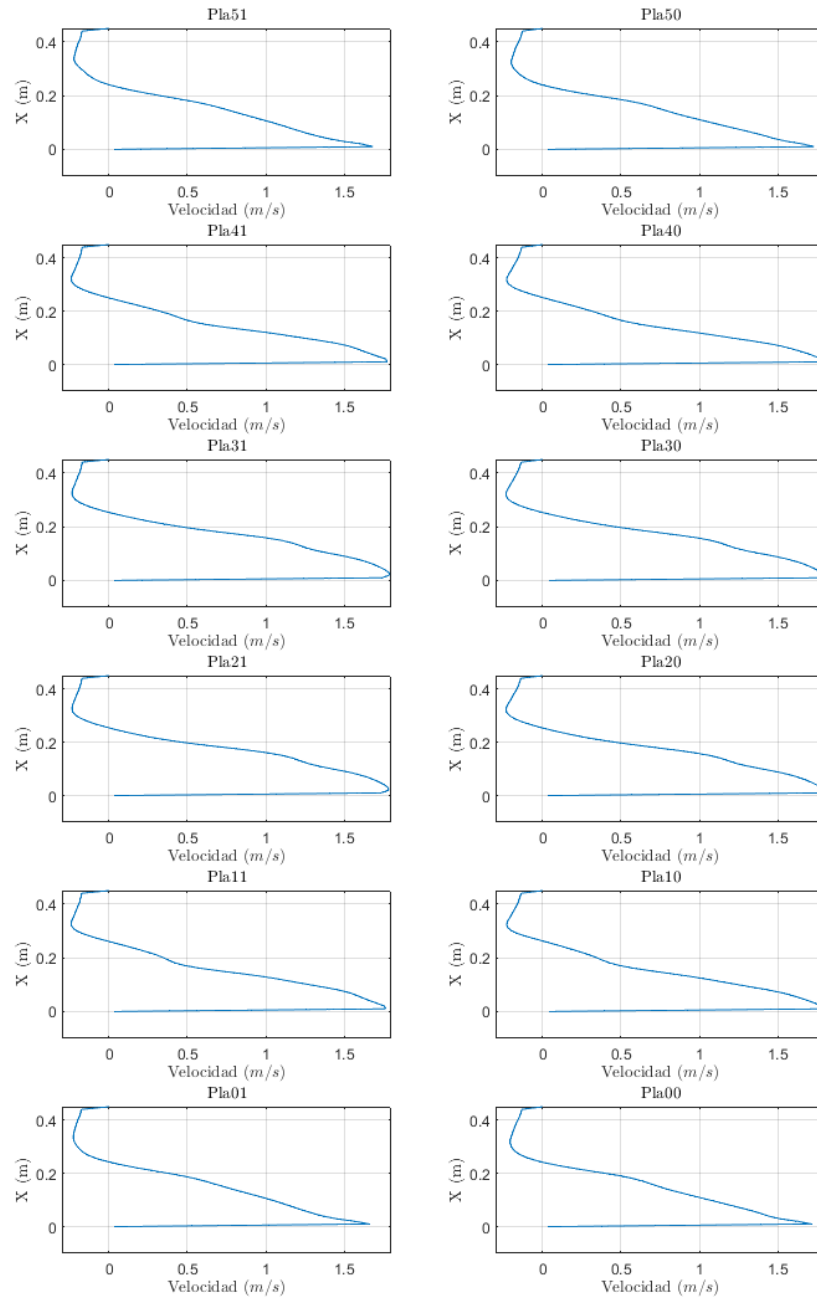


Figura 34: Perfiles de velocidades en cada par de transductores para la Configuración 1.2

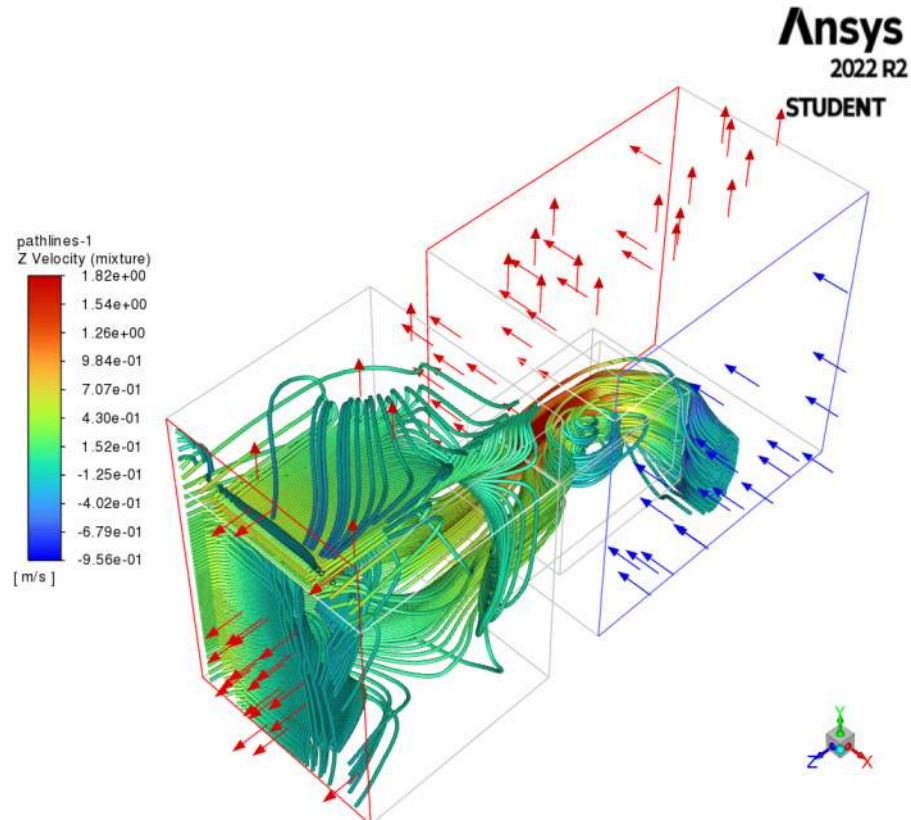


Figura 35: Líneas de Flujo generadas en ANSYS Fluent con magnitud w , velocidad en eje z. Configuración 1.2

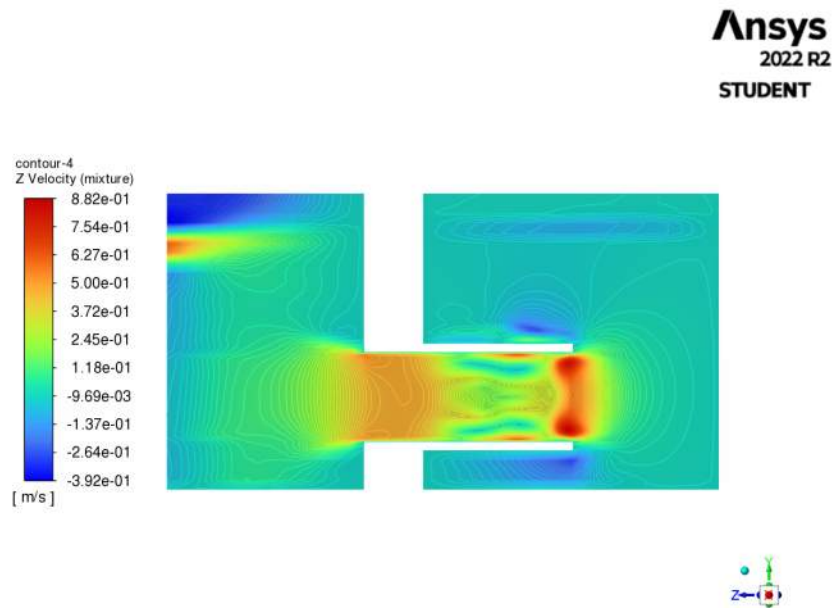


Figura 36: Contorno 2D de velocidad z en el plano ZY generado en ANSYS Fluent. Configuración 1.2

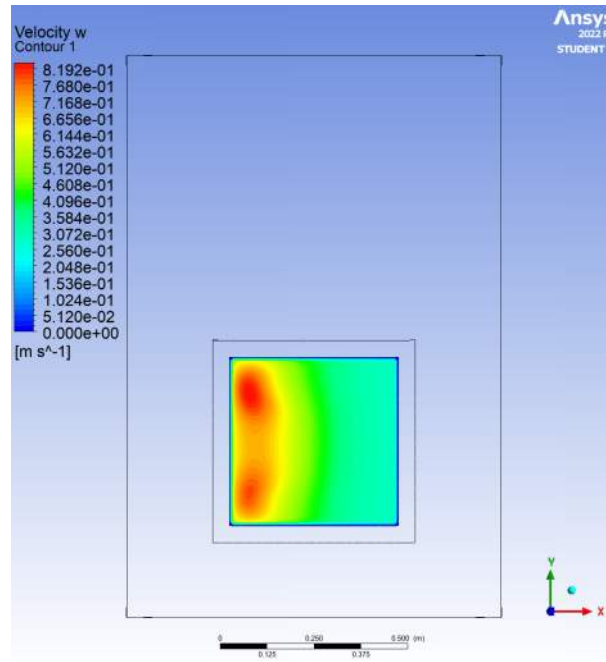


Figura 37: Contorno de velocidades en la compuerta para la configuración 1.2

Se procede a calcular el caudal teórico integrando las medias de velocidad de cada par de transductores en cada plano:

- Caudal calculado en ANSYS Fluent: $0.098 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Caudal calculado integrando las velocidades representadas: $0.084 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Error: $0.014 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Exactitud: 14.29 %

6.1.3. Configuración 1.3

Procesados los valores de velocidad en cada uno de los pares de transductores, se representan un perfil de estos mediante MATLAB en la Figura 38.

Se representa también mediante ANSYS Fluent las líneas de flujo desde la entrada de agua hasta la salida representando la magnitud de la velocidad en el eje z como se muestra en la Figura 39.

Se representa también mediante ANSYS Fluent el campo de velocidades en Z (w) en la lámina de agua generada en la Figura 40. En la Figura 41 se representa también mediante ANSYS Fluent, un corte en el plano ZY en el centro $X=0$ del modelo.

Se representa finalmente en la Figura 42 mediante ANSYS Fluent un contorno de la magnitud de la velocidad en el eje z, computando dentro del entorno del programa el caudal másico.

Perfil de velocidades en cada par de transductores. Configuración 1.3

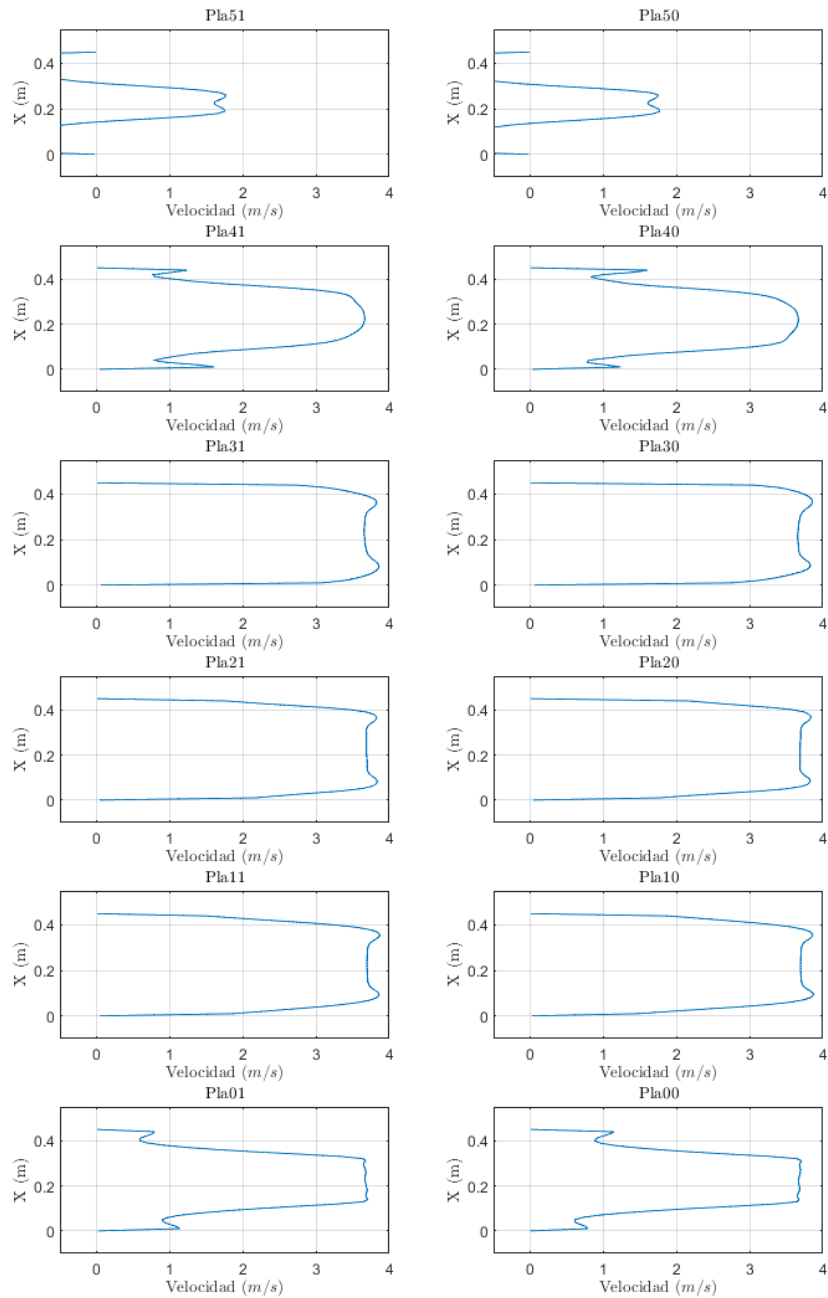


Figura 38: Perfiles de velocidades en cada par de transductores para la Configuración 1.3

Ansys
2022 R2
STUDENT

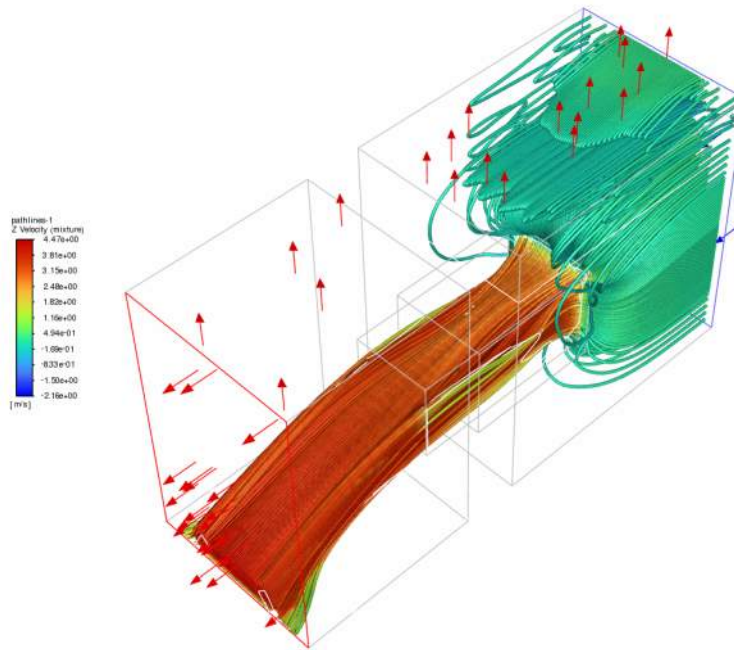


Figura 39: Líneas de Flujo generadas en ANSYS Fluent con magnitud w , velocidad en eje z. Configuración 1.3

Ansys
2022 R2
STUDENT

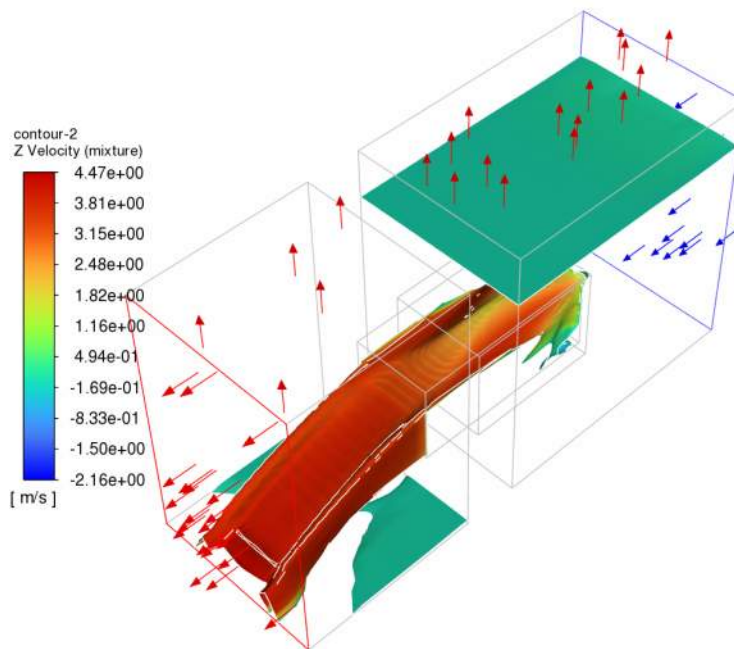


Figura 40: Velocidad (w) de la lámina de agua generada en ANSYS Fluent. Configuración 1.3

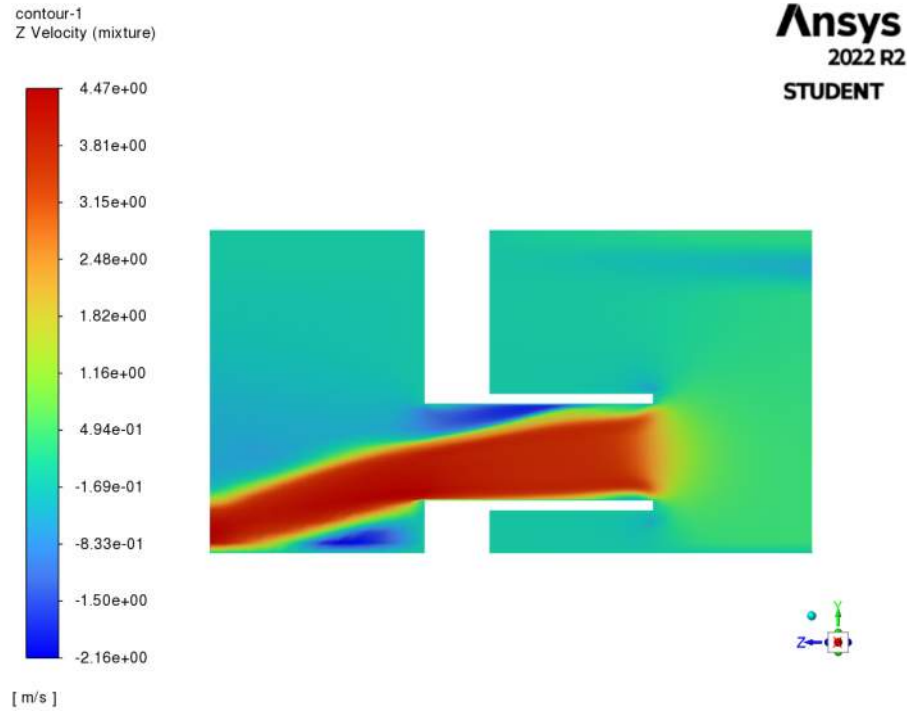


Figura 41: Contorno 2D de velocidad z en el plano ZY generado en ANSYS Fluent. Configuración 1.3

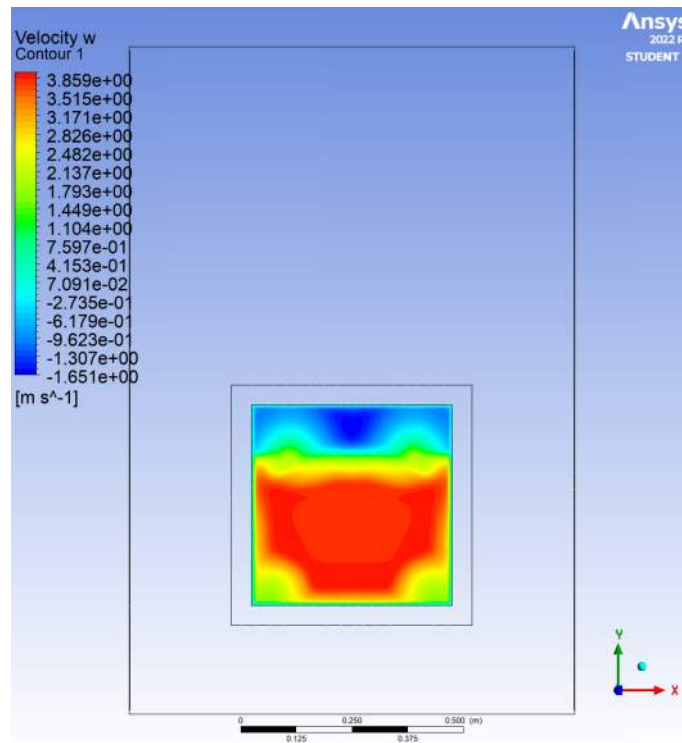


Figura 42: Contorno de velocidades en la compuerta para la configuración 1.3

Se procede a calcular el caudal teórico integrando las medias de velocidad de cada par de transductores en cada plano:

- Caudal calculado en ANSYS Fluent: $0.476 \text{ m}^3/s$.
- Caudal calculado integrando las velocidades representadas: $0.477 \text{ m}^3/s$.
- Error: $0.001 \text{ m}^3/s$.
- Exactitud: 0.21 %

6.2. Configuración 2

En esta segunda configuración, la apertura de la compuerta es aproximadamente del 50 %, se corresponde con un paso libre del flujo de 220 mm de los 450 mm posibles.

6.2.1. Configuración 2.1

Como en el análisis de las configuraciones anteriores, procesados los valores de velocidad en cada uno de los pares de transductores, se representan estos mediante MATLAB en la Figura 43. La distribución de velocidades, en términos generales es muy similar a las de la Configuración 1.1 (flujo axial), aunque con velocidades menores debido a la restricción del cierre de la compuerta que provoca mayor pérdida de energía (o carga, en términos de Ingeniería Hidráulica).

Se representa mediante ANSYS Fluent las líneas de flujo desde la entrada de agua hasta la salida, representando la magnitud de la velocidad en el eje z como se muestra en la Figura 44. En la Figura 45 se representa también mediante ANSYS Fluent un contorno de velocidades en el eje z (w) y sus isolíneas, en un corte en el plano ZY en el centro $X=0$ del modelo.

Se representa también en la Figura 46 mediante ANSYS Fluent un contorno de la magnitud de la velocidad en el eje z, utilizado para computar dentro del entorno del programa el caudal másico.

Perfil de velocidades en cada par de transductores. Configuración 2.1

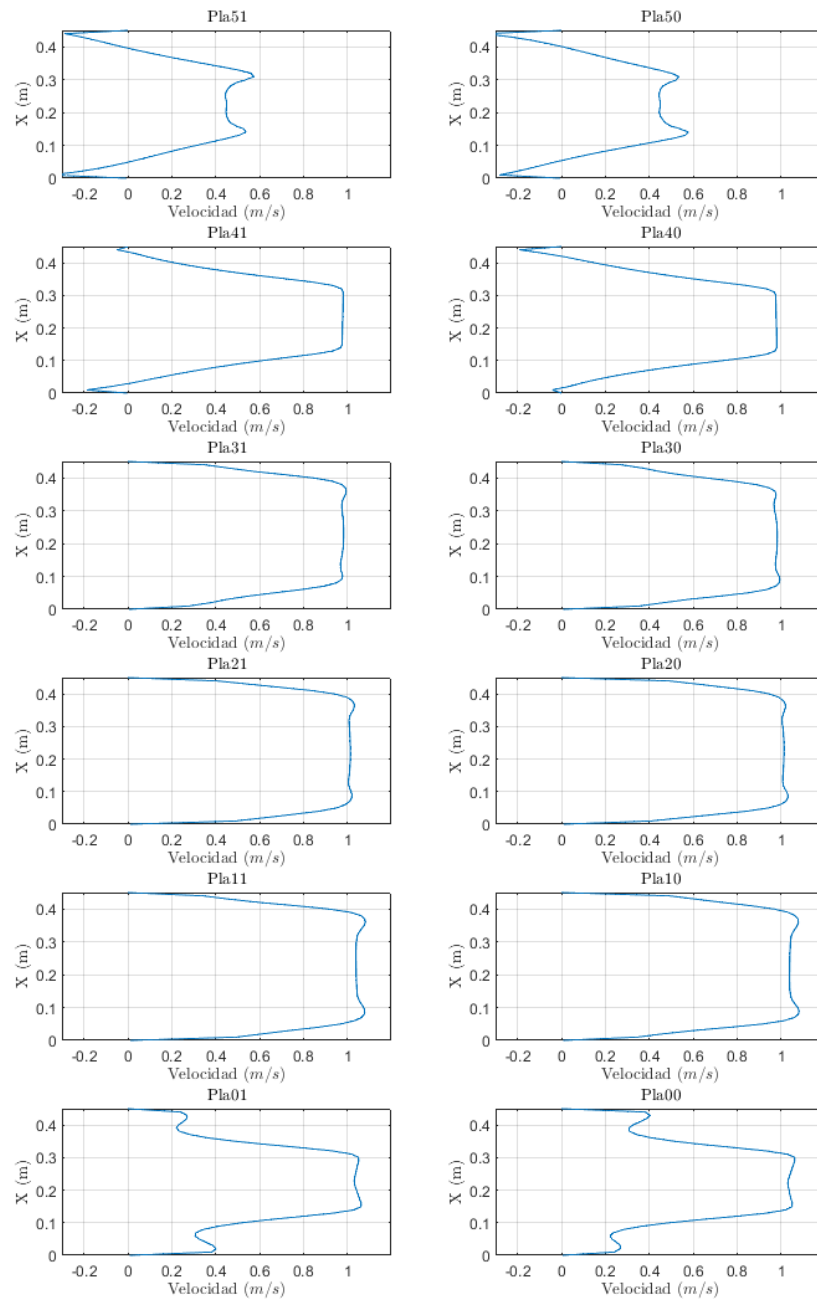


Figura 43: Perfiles de velocidades en cada par de transductores para la Configuración 2.1

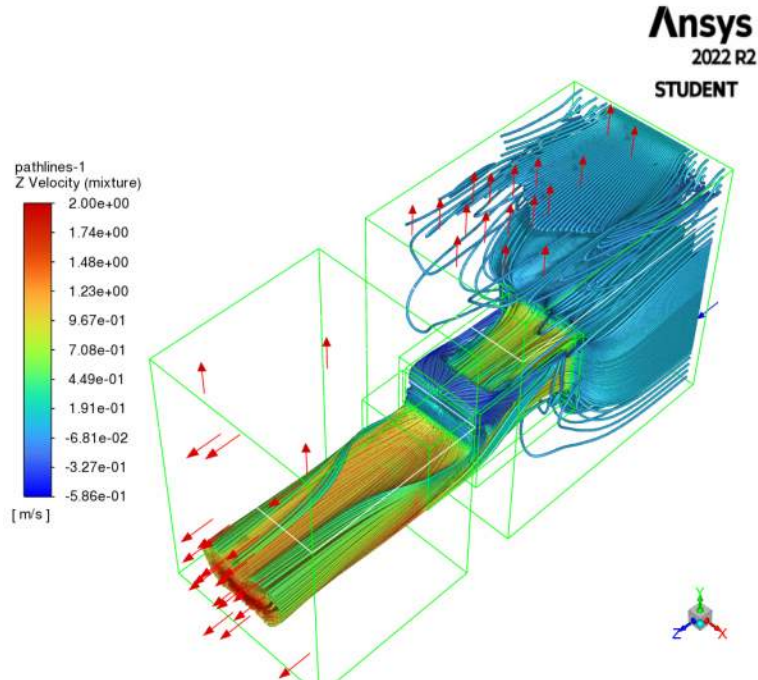


Figura 44: Líneas de Flujo generadas en ANSYS Fluent con magnitud w , velocidad en eje z. Configuración 2.1

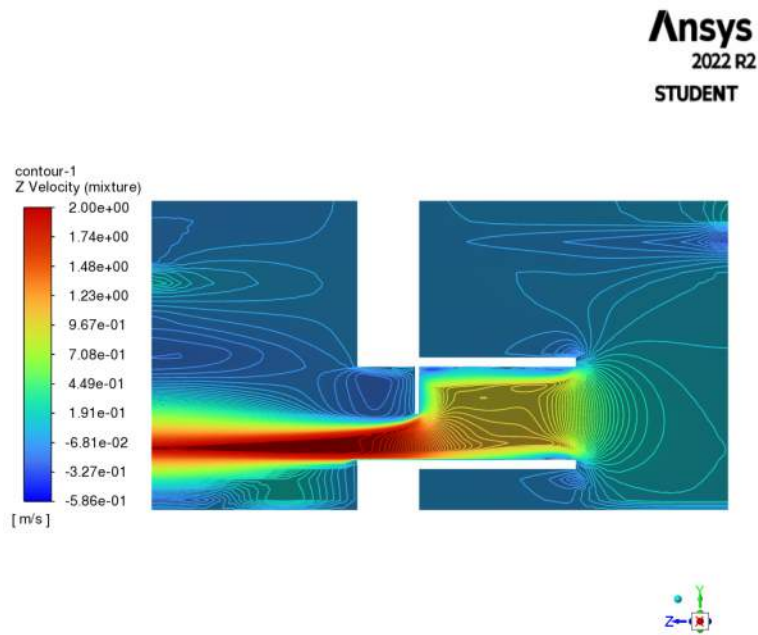


Figura 45: Contorno 2D de velocidad z en el plano ZY generado en ANSYS Fluent. Configuración 2.1

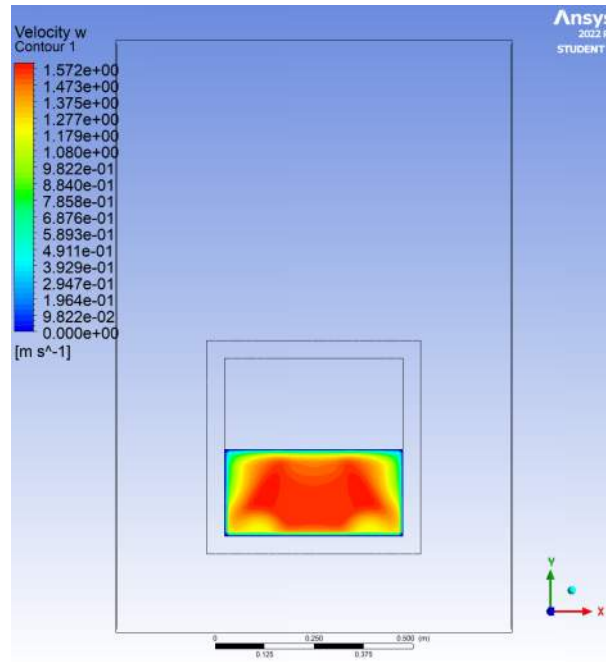


Figura 46: Contorno de velocidades en la compuerta para la configuración 2.1

Se procede a calcular el caudal teórico integrando las medias de velocidad de cada par de transductores en cada plano:

- Caudal calculado en ANSYS Fluent: $0.136 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Caudal calculado integrando las velocidades representadas: $0.132 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Error: $0.004 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Exactitud: 2.94 %

6.2.2. Configuración 2.2

Como en el análisis de las configuraciones anteriores, procesados los valores de velocidad en cada uno de los pares de transductores, se representan estos mediante MATLAB en la Figura 47.

Se representa mediante ANSYS Fluent las líneas de flujo en sentido inverso desde la salida de agua hasta la entrada, representando la magnitud de la velocidad en el eje z como se muestra en la Figura 48. También se representa un corte en el plano ZY en el centro $X=0$ del modelo la magnitud de la velocidad w, en la Figura 49.

Se representa también en la Figura 50 mediante ANSYS Fluent un contorno de la magnitud de la velocidad en el eje z, computando dentro del entorno del programa el caudal másico.

Perfil de velocidades en cada par de transductores. Configuración 2.2

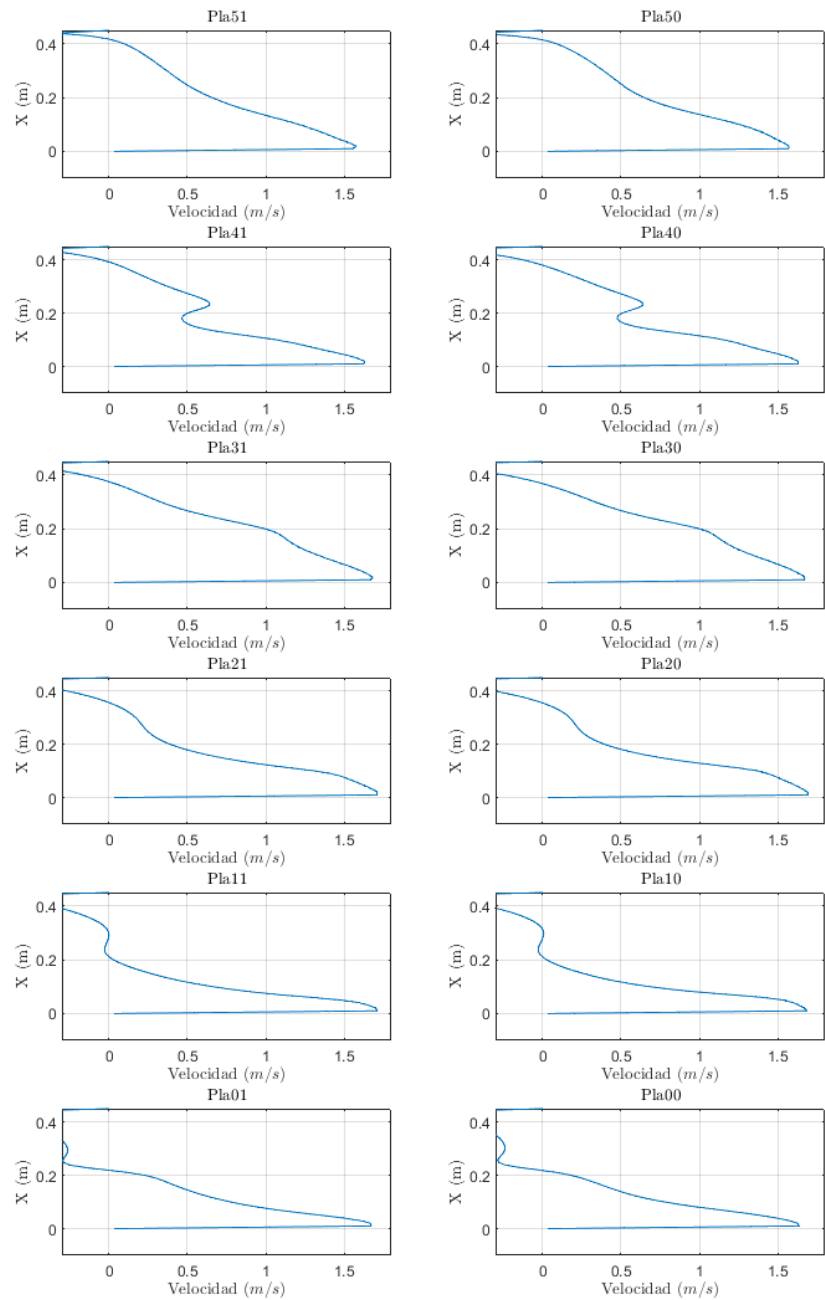


Figura 47: Perfiles de velocidades en cada par de transductores para la Configuración 2.2

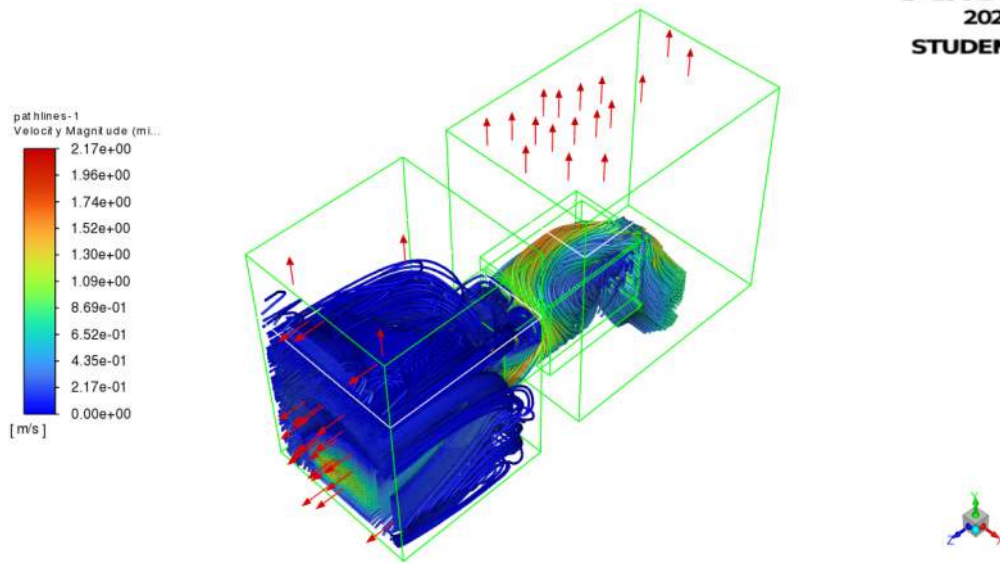


Figura 48: Líneas de Flujo generadas en ANSYS Fluent con magnitud w , velocidad en eje z. Configuración 2.2

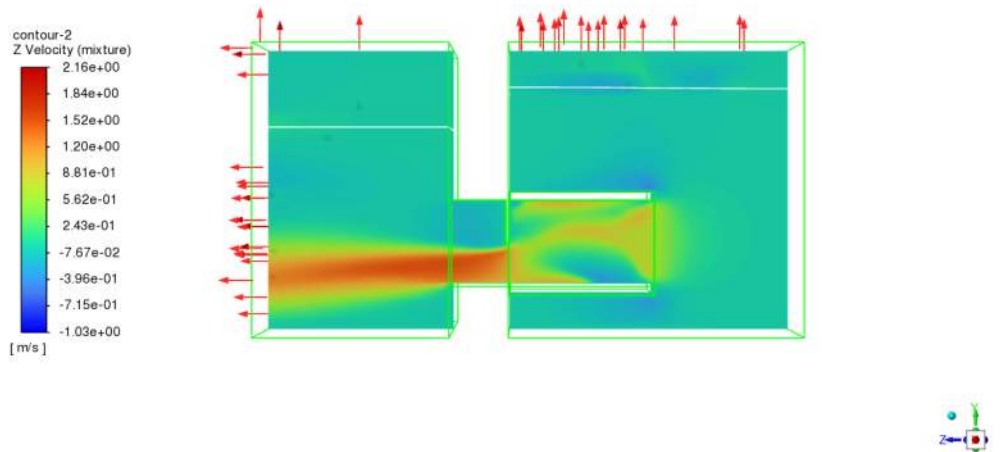


Figura 49: Contorno 2D de velocidad z en el plano ZY generado en ANSYS Fluent. Configuración 2.2

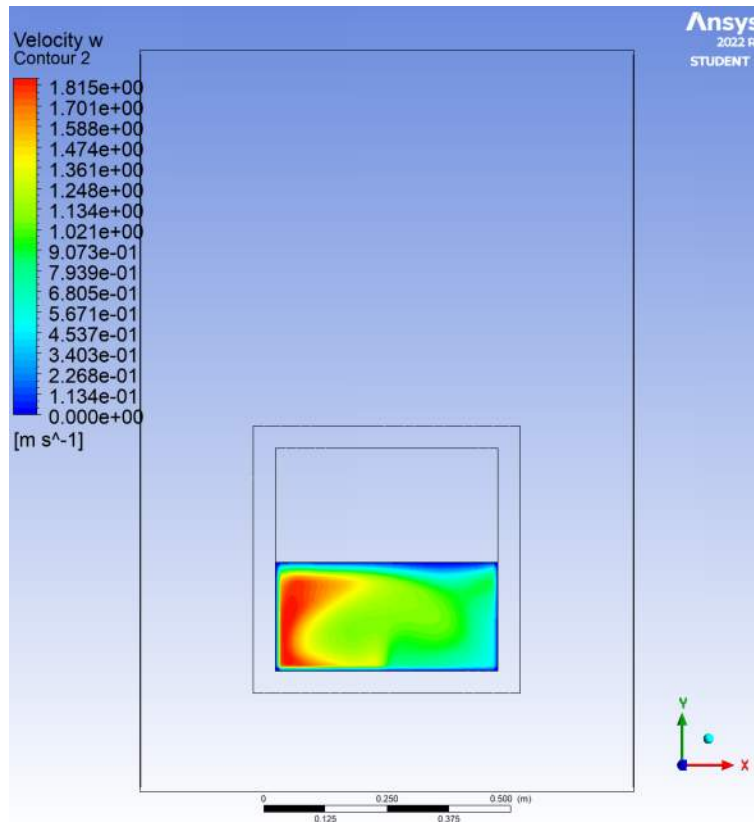


Figura 50: Contorno de velocidades en la compuerta para la configuración 2.2

Se procede a calcular el caudal teórico integrando las medias de velocidad de cada par de transductores en cada plano:

- Caudal calculado en ANSYS Fluent: $0.105 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Caudal calculado integrando las velocidades representadas: $0.091 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Error: $0.014 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Exactitud: 13.33 %

6.2.3. Configuración 2.3

Como en el análisis de las configuraciones anteriores, procesados los valores de velocidad en cada uno de los pares de transductores, se representan estos mediante MATLAB en la Figura 51.

Se representa mediante ANSYS Fluent las líneas de flujo desde la salida de agua en el eje Z (plano XY) hasta la entrada lateral, representando la magnitud de la velocidad en el eje z (w) como se muestra en la Figura 52. Conjuntamente a esta Figura, se muestra la magnitud de la velocidad w en la lámina de agua que genera la simulación como se observa en la Figura 53. Se representa también en la Figura 54 un detalle

del cajón-cudalímetro de la compuerta visto en planta con las líneas de flujo representando la magnitud de la velocidad w .

En la Figura 55 se representa también mediante ANSYS Fluent un contorno de velocidades en el eje z (w), en un corte en el plano ZY en el centro $X=0$ del modelo.

Finalmente, se representa en la Figura 56 mediante ANSYS Fluent un contorno de la magnitud de la velocidad en el eje z , computando dentro del entorno del programa el caudal másico.

Perfil de velocidades en cada par de transductores. Configuración 2.3

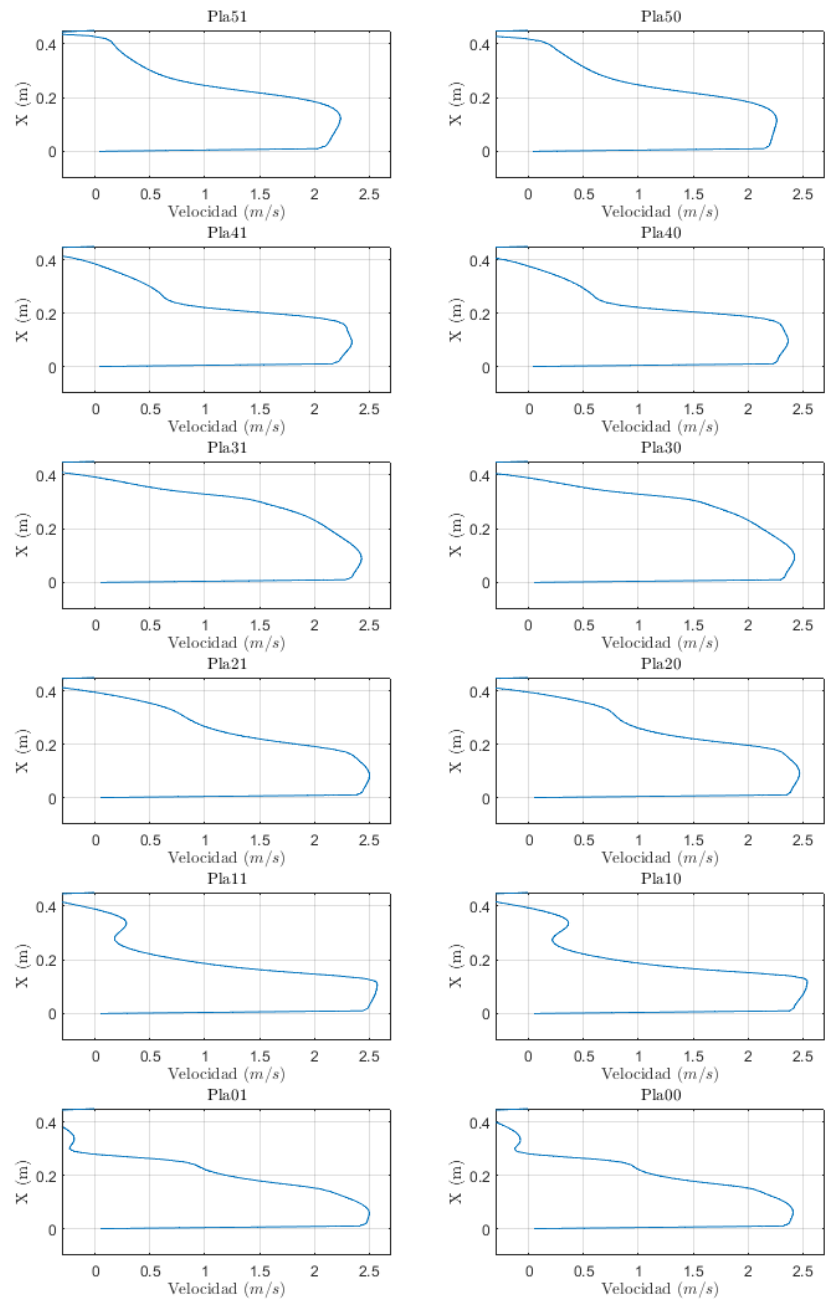


Figura 51: Perfiles de velocidades en cada par de transductores para la Configuración 2.3

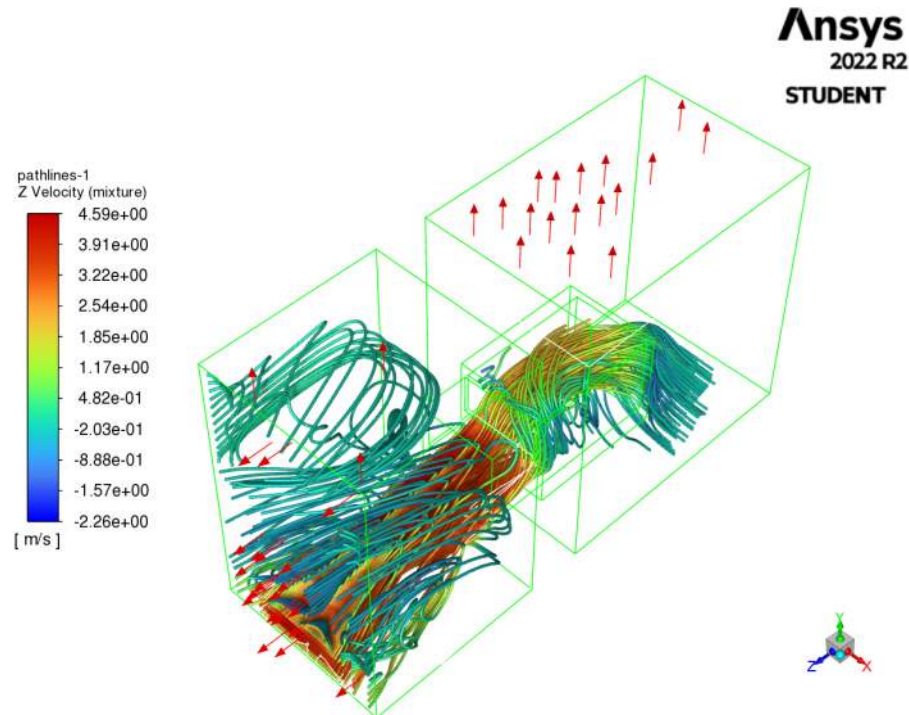


Figura 52: Líneas de Flujo generadas en ANSYS Fluent con magnitud w , velocidad en eje z. Configuración 2.3

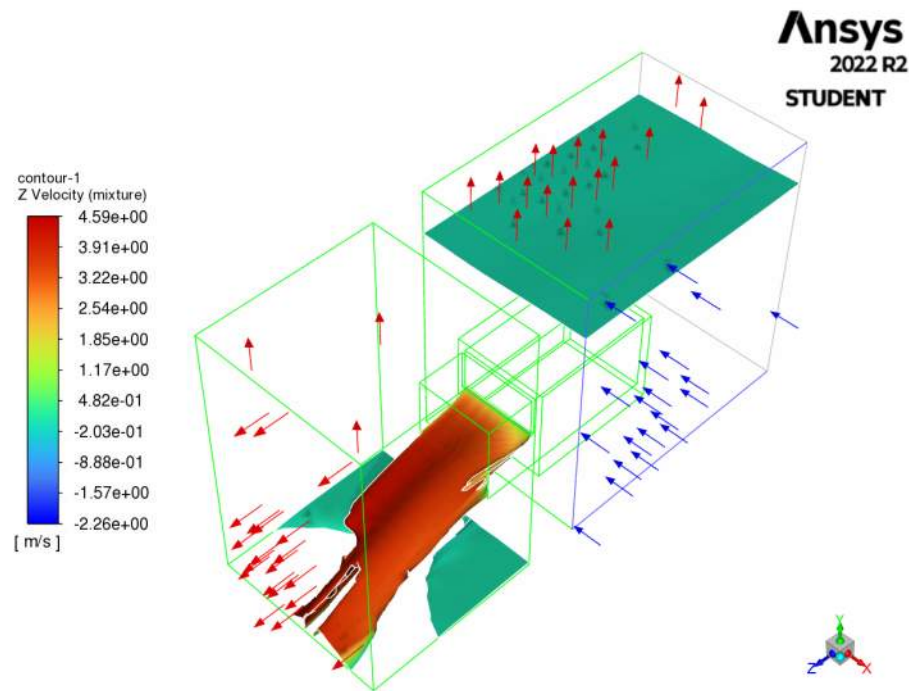


Figura 53: Velocidad w en la lámina de agua generado en ANSYS Fluent. Configuración 2.3

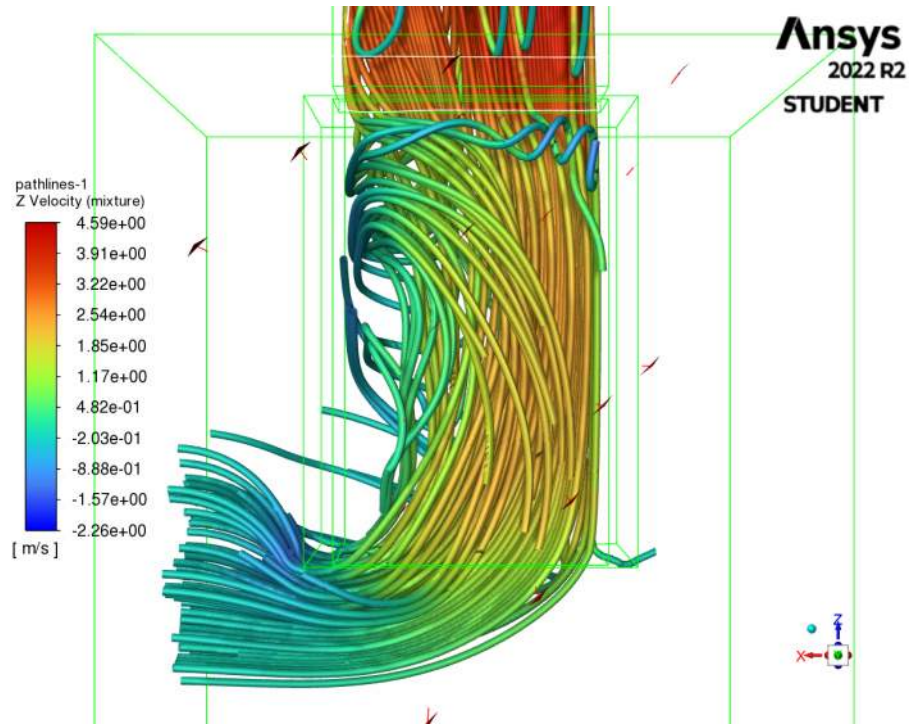


Figura 54: Contorno 2D de velocidad z en el plano ZY generado en ANSYS Fluent. Configuración 2.3

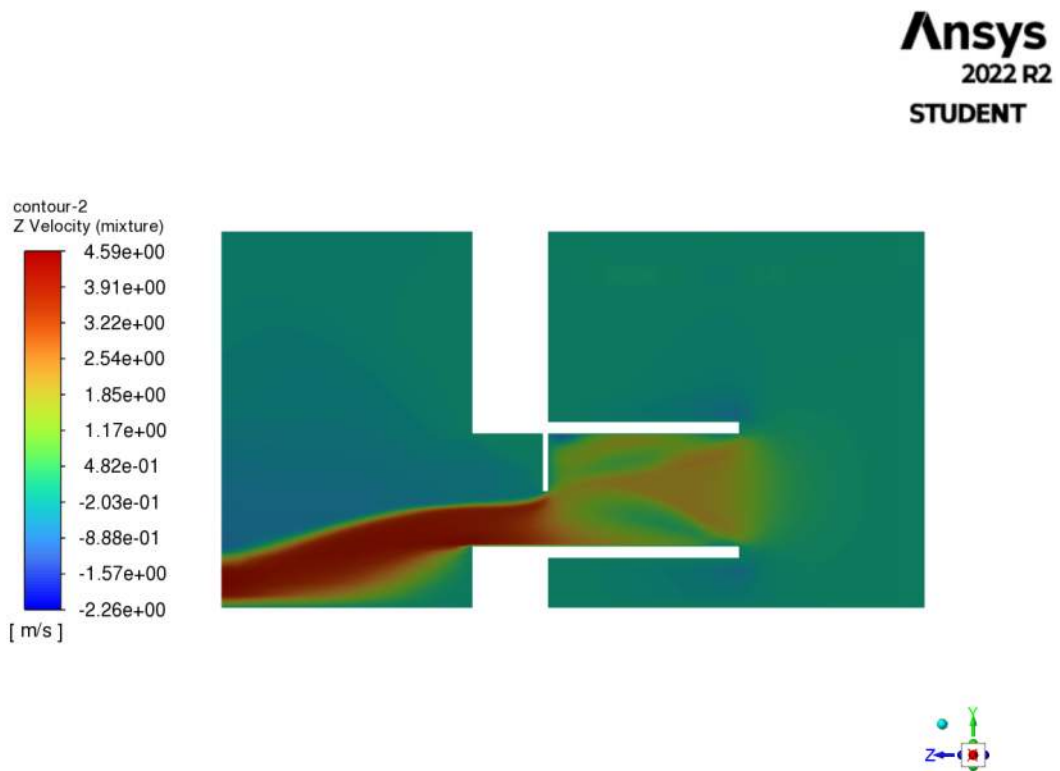


Figura 55: Contorno 2D de velocidad z en el plano ZY generado en ANSYS Fluent. Configuración 2.3

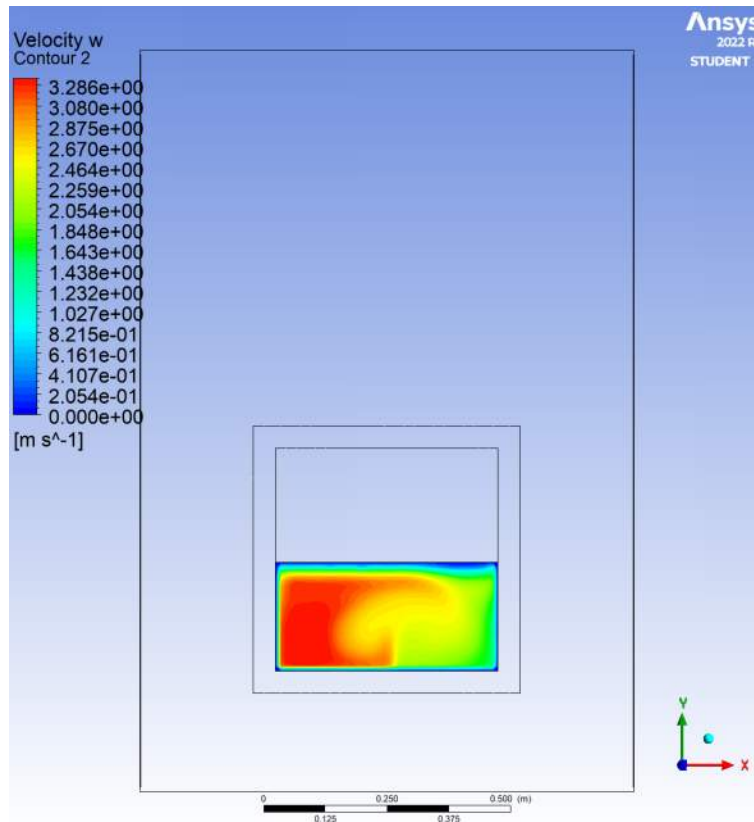


Figura 56: Contorno de velocidades en la compuerta para la configuración 2.3

Se procede a calcular el caudal teórico integrando las medias de velocidad de cada par de transductores en cada plano:

- Caudal calculado en ANSYS Fluent: $0.245 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Caudal calculado integrando las velocidades representadas: $0.224 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Error: $0.021 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Exactitud: 8.57 %

6.3. Configuración 3

En esta última configuración la apertura de la compuerta se reduce significativamente hasta aproximadamente el 10 y el 20 %, lo que se traduce a una apertura de 50 mm y 100 mm respectivamente de los 450 mm posibles.

6.3.1. Configuración 3.1

Se procesan los valores de velocidad en cada uno de los pares de transductores, se representan estos mediante MATLAB en la Figura 57.

En la Figura 58 se representa mediante ANSYS Fluent las líneas de flujo representando su velocidad w desde la entrada del flujo hasta la salida del dominio computacional.

En la Figura 59 Se representa un contorno de velocidades en el eje z (w) y sus isolíneas, en un corte en el plano ZY en el centro $X=0$ del modelo.

Se representa también en la Figura 60 mediante ANSYS Fluent un contorno de la magnitud de la velocidad en el eje z , computando dentro del entorno del programa el caudal másico.

Perfil de velocidades en cada par de transductores. Configuración 3.1

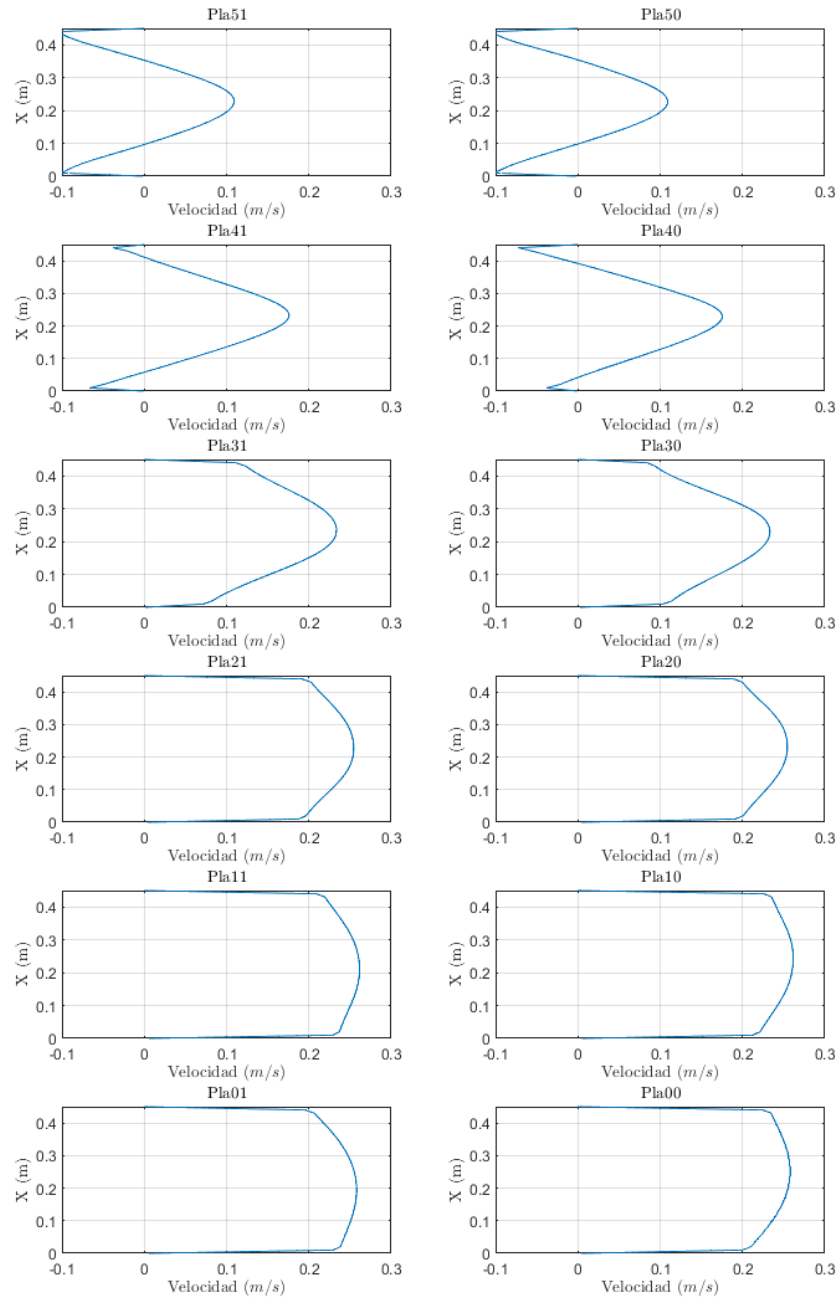


Figura 57: Perfiles de velocidades en cada par de transductores para la Configuración 3.1

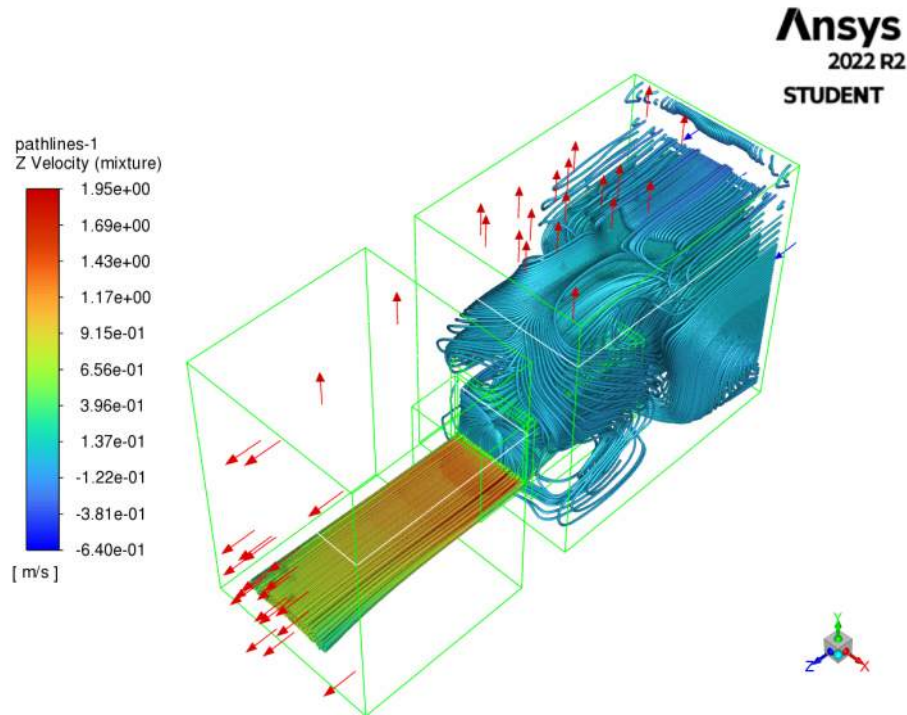


Figura 58: Líneas de Flujo generadas en ANSYS Fluent con magnitud w , velocidad en eje z. Configuración 3.1

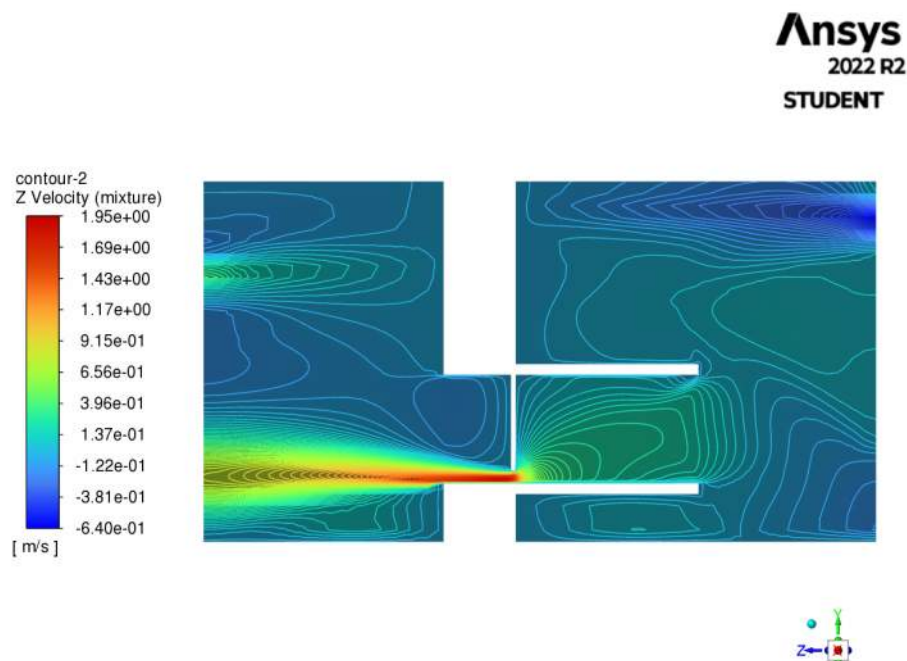


Figura 59: Contorno 2D de velocidad z en el plano ZY generado en ANSYS Fluent. Configuración 3.1

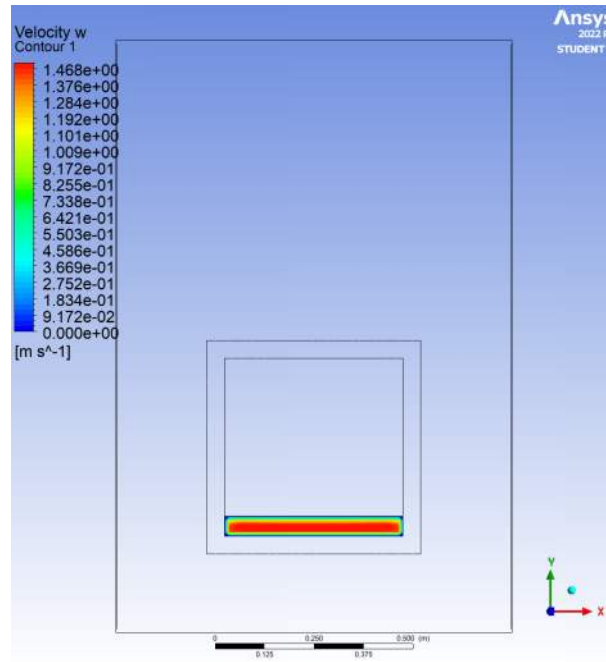


Figura 60: Contorno de velocidades en la compuerta para la configuración 3.1

Se procede a calcular el caudal teórico integrando las medias de velocidad de cada par de transductores en cada plano:

- Caudal calculado en ANSYS Fluent: $0.032 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Caudal calculado integrando las velocidades representadas: $0.030 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Error: $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Exactitud: 6.25 %

6.3.2. Configuración 3.2

Se procesan los valores de velocidad en cada uno de los pares de transductores, se representan estos mediante MATLAB en la Figura 61.

Se representa mediante ANSYS Fluent las líneas de flujo desde la entrada de agua hasta la salida, representando la magnitud de la velocidad en el eje z como se muestra en la Figura 62 y un detalle del vórtice generado dentro del cajón en la Figura 63. También se representa la velocidad w en un corte en el plano ZY en el centro $X=0$ del modelo en la Figura 64

Se representa también en la Figura 65 mediante ANSYS Fluent un contorno de la magnitud de la velocidad en el eje z, computando dentro del entorno del programa el caudal másico.

Perfil de velocidades en cada par de transductores. Configuración 3.2

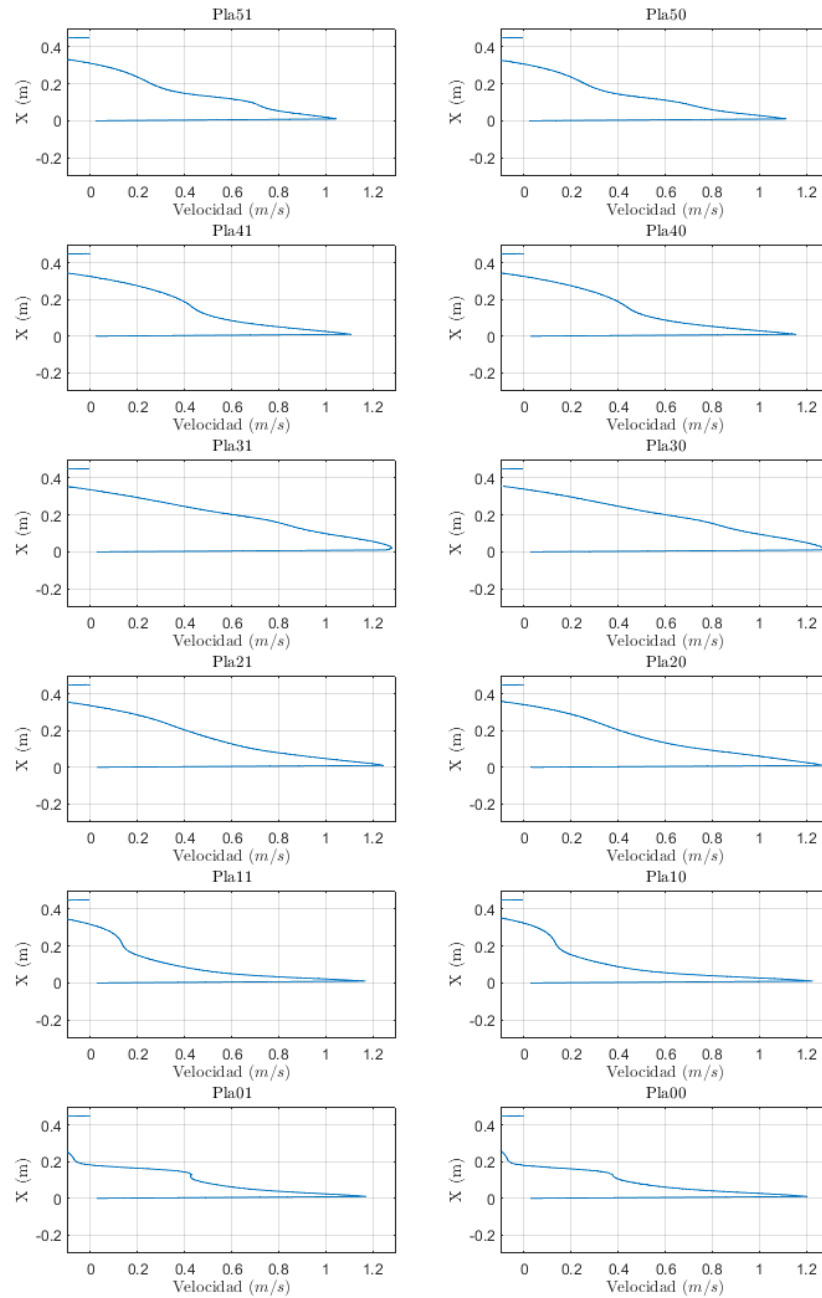


Figura 61: Perfiles de velocidades en cada par de transductores para la Configuración 3.2

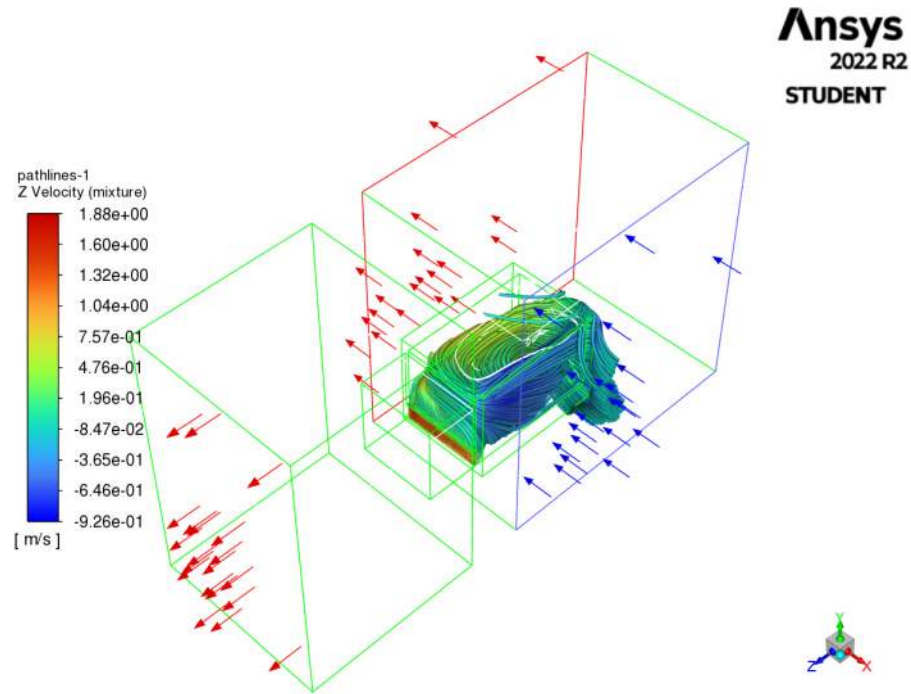


Figura 62: Líneas de Flujo generadas en ANSYS Fluent con magnitud w , velocidad en eje z. Configuración 3.2

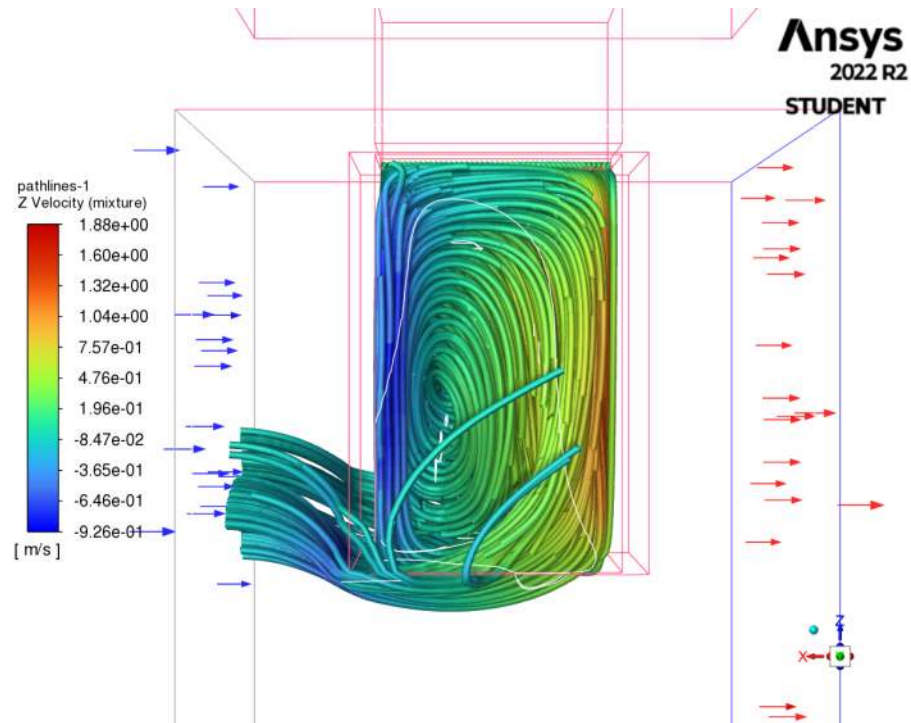


Figura 63: Detalle de las líneas de Flujo en el interior del cajón-caudalímetro generadas en ANSYS Fluent con magnitud w , velocidad en eje z. Configuración 3.2

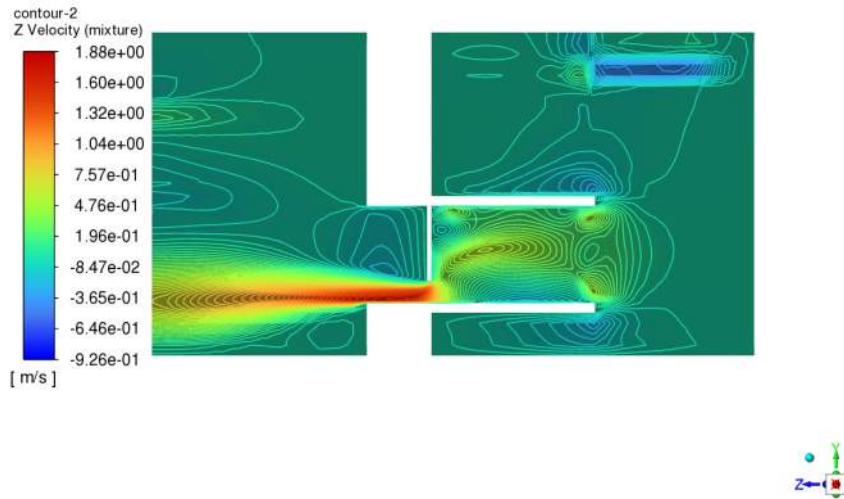


Figura 64: Contorno 2D de v3locidad z en el plano ZY generado en ANSYS Fluent. Configuración 3.2

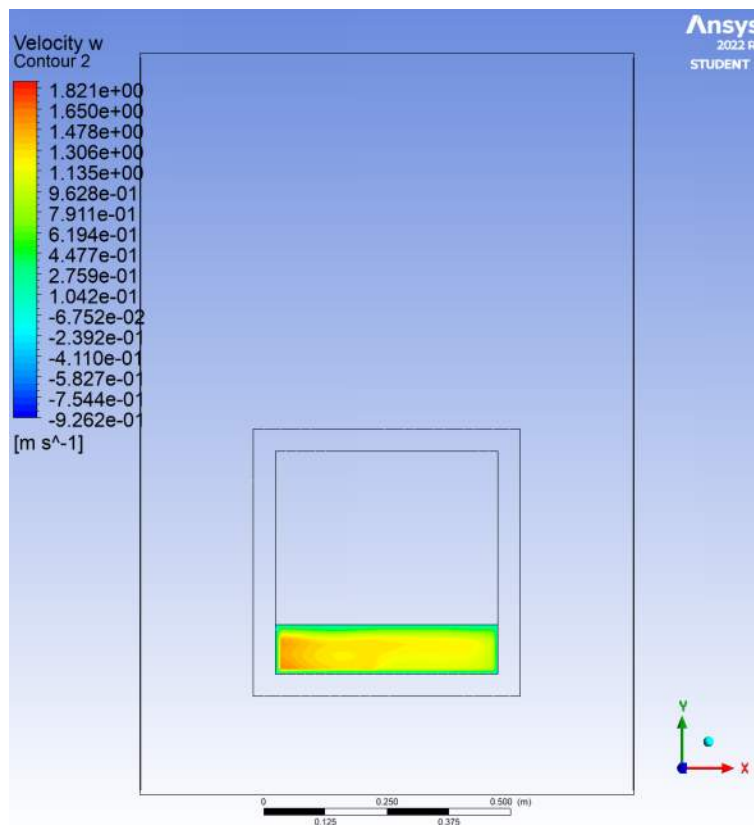


Figura 65: Contorno de velocidades en la compuerta para la configuración 3.2

Se procede a calcular el caudal teórico integrando las medias de velocidad de cada par de transductores en cada plano:

- Caudal calculado en ANSYS Fluent: $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Caudal calculado integrando las velocidades representadas: $0.043 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Error: $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Exactitud: 2.38 %

7. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

En este último apartado del trabajo, se discuten las conclusiones fruto del análisis de los resultados numérico expuestos en el anterior apartado. En primer lugar, en el Cuadro 4 se presenta un resumen de los principales datos de interés recogidos en el anterior apartado, comparando el caudal circulante mediante ANSYS con el caudal calculado

Configuración	Apertura	Tipo	Caudal	Caudal	Error	Exactitud
	%	de flujo	ANSYS	MATLAB	(m^3/s)	%
			(m^3/s)	(m^3/s)		
1.1	100	Axial	0.213	0.211	0.002	0.94
1.2	100	Transversal	0.098	0.084	0.014	14.29
1.3	100	Axial (caída libre)	0.476	0.477	0.001	0.21
2.1	50	Axial	0.136	0.132	0.004	2.94
2.2	50	Transversal	0.105	0.091	0.014	13.33
2.3	50	Transversal (caída libre)	0.245	0.224	0.021	8.57
3.1	10	Axial	0.032	0.030	0.002	6.25
3.2	20	Transversal	0.042	0.043	0.001	2.38

Cuadro 4: Resumen de los principales resultado analizados en las simulaciones

7.1. Simulaciones que presentan mayor grado de exactitud

Las simulaciones que han presentado una menor exactitud teórica (menor al 3%) son:

- Configuración 1.1
- Configuración 1.3
- Configuración 2.1
- Configuración 3.2

Las tres primeras simulaciones citadas, configuraciones 1.1, 1.3 y 2.1, tienen en común el tipo de flujo Axial. Los perfiles de velocidades resultantes, Figuras 30, 38 y 43 respectivamente:

- Presentan distribuciones homogéneas que se asimilan a una parábola excepto en el dominio central donde el flujo lejano a la pared está desarrollado y presenta una velocidad constante (perfil plano de velocidades).
- Valores negativos de velocidad poco representativos.
- Las velocidades medias observadas en los distintos planos son superiores a 1.0 m/s.
- Estas tres simulaciones se podrían haber realizado considerando un flujo axisimétrico en el eje X, estas simulaciones de mayor exactitud teórica se corresponden a aquellas que tienen una distribución de velocidades simétrica en el plano YX en la zona de la hoja de la compuerta (Figuras 33, 42 y 46 respectivamente).

Las condiciones de contorno de estas simulaciones, que ofrecen un mayor grado de exactitud teórica, se corresponden con las condiciones de contorno que **Rubicon Water** prefiere y aconseja en el momento de diseñar y llevar a cabo la instalación de este equipo, es decir, un flujo axial canalizado hacia la compuerta sin presencia de obstrucciones aguas arriba. Cabe destacar que, las simulaciones presentadas, no tienen en cuenta los efectos derivados de la explotación del equipo y que, en el entorno poco controlado en el que operan estos equipos, la dinámica del flujo puede llegar a varar notablemente durante su explotación (normalmente en el transcurso de cada campaña de riego); en campo, en los sistemas de canales de riego en los que se instalan estos equipos, pueden existir los siguientes elementos que podrían causar efectos negativos en la medición, pudiéndose corregir con un mantenimiento preventivo:

- Acumulación de elementos flotantes como pueden ser: material vegetal, residuos urbanos (fruto de comportamientos incívicos principalmente), animales muertos.
- Acumulación de fangos y otros componentes que se depositan en el fondo del cajón-caudalímetro y pueden obstaculizar los caminos de lectura de los transductores.

- Entrada excesiva de la fase aire por un decremento considerable del nivel de agua aguas arriba de la compuerta o un exceso de apertura de la misma que pueden provocar un cambio de régimen del flujo a supercrítico ($Fr < 1$) incrementando la energía cinética y disminuyendo la energía potencial, este efecto puede dejar sin lectura alguno de los pares de transductores de la parte superior del cajón-caudalímetro.

Respecto a estos dos últimos puntos, en las situaciones excepcionales en los que alguno de los transductores no darían lectura, **Rubicon Water** recomienda que al menos el 50% de los pares de transductores esté operativo.

Por ejemplo, en la simulación de la Configuración 1.3 se observa una notable proporción de aire en el interior del cajón-caudalímetro como se ve en la Figura 40, para analizar mejor este efecto y comprobar si alguno de los pares de transductores superiores no pueden medir debido a la presencia de aire en su recorrido, se genera la Figura 66 en la que en escala de grises se representa la fracción del volumen de agua y en amarillo el plano que abarca cada par de transductores.

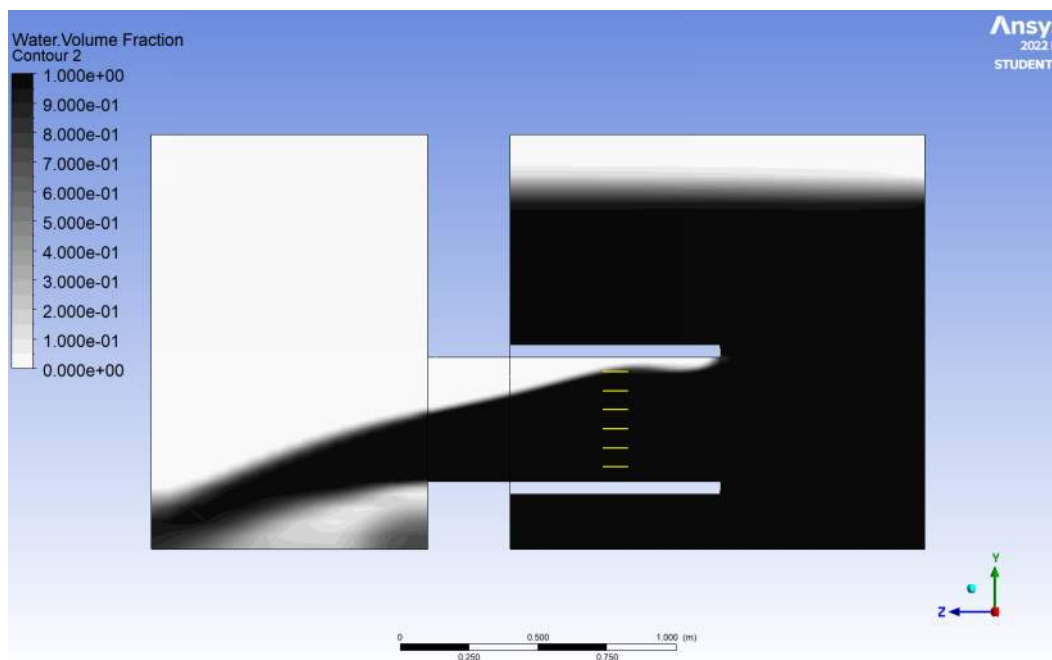


Figura 66: Contorno del volumen de agua que muestra la lámina de agua generada en la simulación 1.3

En este caso, todos los pares de transductores tendrían su correspondiente línea de medida con una proporción de volumen de agua próxima a 1, aunque algún cambio en las condiciones de contorno, podrían provocar que en el plano generado por el par de transductores superiores el volumen de agua descendiera y la proporción de aire fuera 1 o próxima a este valor, en este caso, estos transductores no se tomarían en cuenta para computar el caudal.

La Configuración 3.2 podría parecer un caso excepcional en el que, a pesar de no tener un flujo lineal, las velocidades generadas son bajas y el caudal también, debido a la poca pérdida de carga entre aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, estos hechos proporcionan una situación favorable a la medición de caudal.

7.2. Simulaciones con flujo transversal

Las simulaciones con flujo transversal son:

- Configuración 1.2
- Configuración 2.2
- Configuración 2.3
- Configuración 3.2

Las dos últimas configuradas con caída libre aguas abajo de la compuerta.

Los perfiles de velocidades w resultantes, Figuras 34, 47, 51 y 61 respectivamente:

- Presentan distribuciones no homogéneas presentando una concentración de los mayores valores de velocidad en la cercanía de la pared más alejada a la entrada del flujo. Gráficamente, este efecto también puede observarse en los contornos de velocidad mostrados en las Figuras 37, 50, 56 y 65
- Los valores negativos de velocidad w toman cierta importancia lo que sugiere la presencia de cuerpos vorticales en el interior del cajón-caudalímetro.

La presencia de este alto nivel de turbulencia en el interior de cajón-caudalímetro es la responsable de obtener valores de exactitud altos. Para mostrar gráficamente este comportamiento, se han generado 2 planos, XY y ZX en el interior del cajón-caudalímetro como se observa en la Figura 67, generando los vectores de velocidad \vec{v} de la Configuración 2.2 en cada uno de ellos, Figuras 68 y 69 respectivamente.

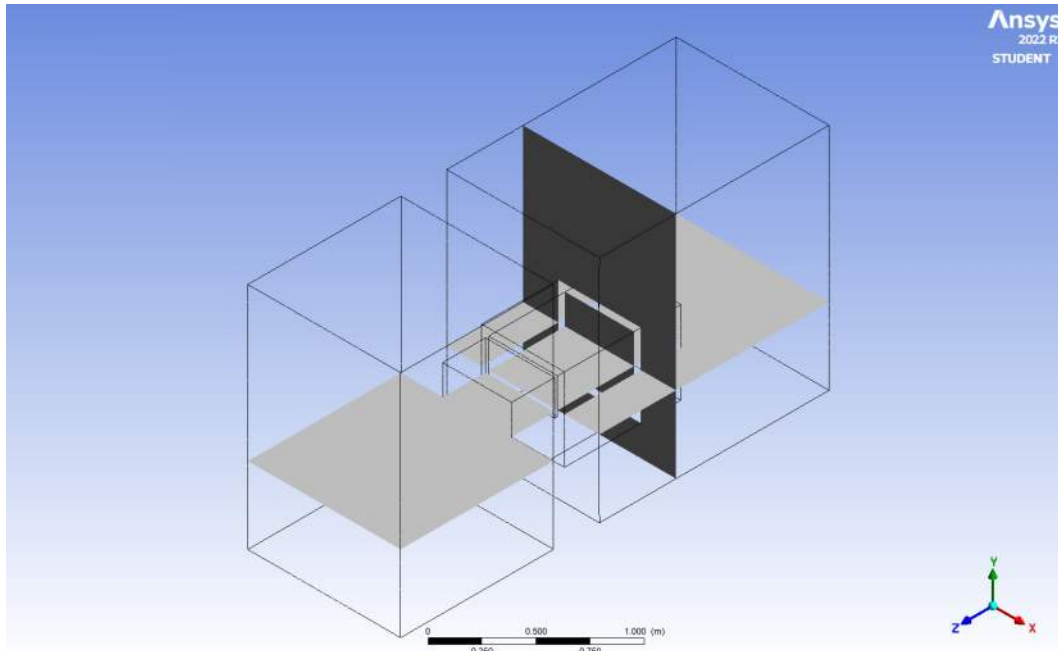


Figura 67: Planos XY y ZX sobre los que se representan los vectores de velocidad \vec{v} en el centro del cajón-caudalímetro para la configuración 2.2

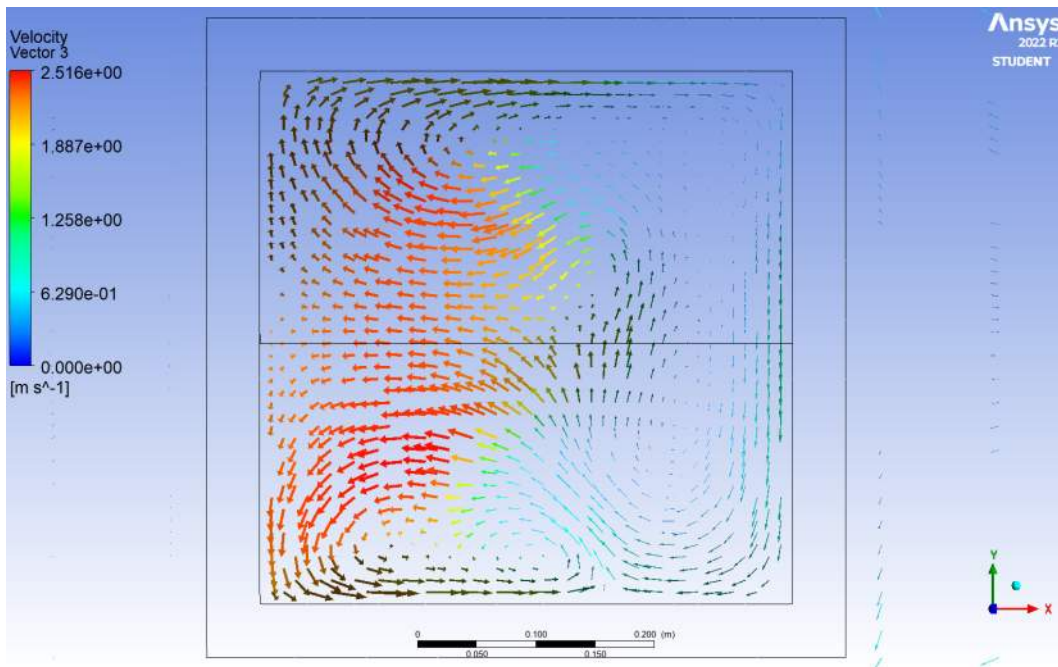


Figura 68: Vectores de velocidad \vec{v} en el plano XY en el centro del cajón-caudalímetro para la configuración 2.2

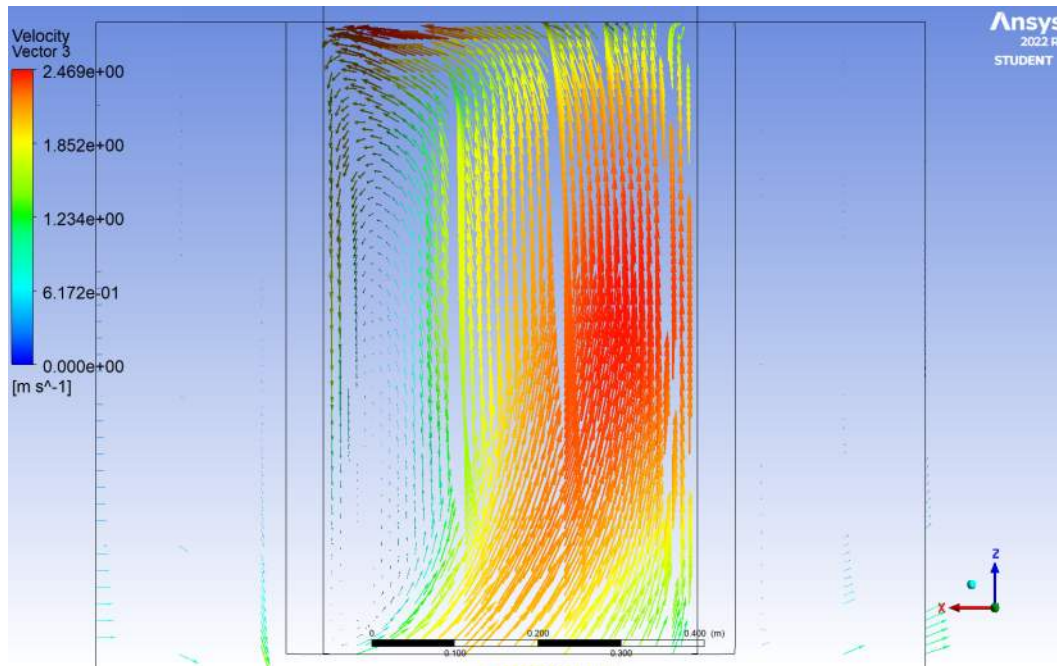


Figura 69: Vectores de velocidad \vec{v} en el plano ZX en el centro del cajón-caudalímetro para la configuración 2.2

Finalmente, es importante comentar que estas condiciones de contorno son extremas, es decir, en primer lugar, estas simulaciones no se han realizado con el marco *flare* que disminuye la turbulencia en el interior de la compuerta, en segundo lugar, **Rubicon Water** no recomienda que un flujo transversal de impacte directamente con el lateral del cajón-caudalímetro de la compuerta, este hecho puede darse en una instalación en que la compuerta se coloque en el lateral de un canal de riego, en este caso, para evitar este impacto se recomienda adaptar la obra para que este flujo sea axial a la compuerta, esto puede lograrse:

- Instalando la compuerta en una arqueta aparte en el lateral del canal conectada con este mediante una tubería, como se ha mostrado en la Figura 10.
- Realizando una obertura en el lateral del canal en forma de pequeño canal con muros laterales que evitan que el flujo impacte directamente en el lateral de la compuerta. En la Figura 70 se muestra la instalación de 2 SlipMeter™ en paralelo mediante este sistema.



Figura 70: Instalación de 2 SlipMeter™ en paralelo en el lateral de un canal. Fuente: *Rubicon Water*

7.3. Grado de apertura de la compuerta

Los 3 grupos con los que se han dividido las simulaciones del presente Trabajo Final de Máster son:

- Configuración 1: Compuerta completamente abierta. Grado de apertura 100 %, paso de 450 x 450 mm.
- Configuración 2: Compuerta abierta al 50 %, paso de 450 x 220 mm
- Configuración 3: Configuración con un grado de apertura mínimo de entre el 10 y el 20 %, es decir, paso de entre 450 x 50 mm y 450 x 100 mm.

Con las simulaciones realizadas, centrándose en las simulaciones con flujo axial desde mayor grado de apertura a menor (Configuraciones 1.1, 2.1 y 3.1 respectivamente) parece que la exactitud tiende a empeorar a medida que la compuerta muestra un grado de cierre superior, también se da este hecho con los flujos axiales y condición de caída libre aguas abajo (simulaciones 1.3 y 2.3). Aun así debería realizarse un estudio aparte para analizar la regresión entre la exactitud y el grado de apertura.

7.4. Líneas de trabajo futuras

Una vez terminado el presente Trabajo, analizando los resultados obtenidos y conclusiones extraídas se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Realizar las mismas simulaciones con una malla más refinada que la usada en el presente Trabajo y **añadir el marco deflector** o *entry flare* (elemento número 5 de la Figura 18). Para ello debería usarse un software distinto a ANSYS Fluent con el que no hubiera una restricción de tamaño de la malla o que permitiese más elementos. Se recomienda usar software libre para ello: *Salome* para la realización del mallado, *OpenFOAM* para el cálculo numérico y *Paraview* y *Python* para el postproceso y análisis de resultados. Con ello se podrían comparar las simulaciones y ver cómo mejora el grado de turbulencia en el interior del cajón-caudalímetro.
- Realizar simulaciones en la que algunos de los pares de **transductores no estén operativos**:
 - Trabajar con un nivel de agua arriba que no cubra la totalidad del cajón-caudalímetro dejando al descubierto el primer o el primer y segundo par de transductores (como muestra la Figura 71).
 - Simular la sedimentación de partículas lodosas o arenosas que interrumpen la lectura de los primeros transductores del fondo del cajón-caudalímetro.



Figura 71: 2 SlipMeter™ en paralelo operando semisumergidas. Fuente: *Rubicon Water*

- Realizar simulaciones con **cuerpos flotantes** (basura, animales muertos, etc), estudiar su interacción con el flujo penetrante a la compuerta y cómo afectaría a la medición del caudal.
- Realizar simulaciones URANS, en estado no estacionario, en las que se simule el **cierre de la compuerta** para unas condiciones de contorno determinadas, ver cómo varían los valores de velocidad, caudal y perfiles y contornos de estos. Este estudio podría ir más enfocado al grado de apertura y ver la correlación de éste con la exactitud en la lectura.

Referencias

- ANSYS. (2017, agosto). *Ansyes fluent theory guide* [Manual de software informático]. Canonsburg, PA 15317. Descargado de <http://www.ansys.com>
- ANSYS. (2018, agosto). *Ansyes fluent tutorial guide* [Manual de software informático]. Canonsburg, PA 15317. Descargado de <http://www.ansys.com>
- catchments, W. a. (2023, abril). *Independent Audit of Water Recovery – GMW Connections Project*. Water and catchments. Descargado 2023-06-11, de <https://www.water.vic.gov.au/water-for-agriculture/investment-in-irrigation-efficiency/Connections-Water-Recovery>
- Chow, V. T. (2009). *Open-channel hydraulics*. Caldwell, New Jersey: Blackburn Press.
- Dal-Ré Tenreiro, R., y Ayuga Téllez, F. (2003). *Pequenos embalses de uso agrícola*. Madrid [etc: Mundi-Prensa.
- Dominguez S., F. J. (1974). *Hidraulica*. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas. Descargado 2023-06-12, de <https://snia.mop.gob.cl/repositorioldga/handle/20.500.13000/3424>
- Ferziger, J. H. (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics* (4th ed. 2020 ed.). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-99693-6
- Hahn, B. D. (2020). *Essential MATLAB for engineers and scientists* (Seventh edition ed.). Cambridge, MA: Academic Press.
- Launder, B. (2015, abril). First steps in modelling turbulence and its origins: A commentary on Reynolds (1895) 'On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion'. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 373. doi: 10.1098/rsta.2014.0231
- Leschziner, M. (2016). *Statistical turbulence modelling for fluid dynamics, demystified: an introductory text for graduate engineering students*. London: Imperial College Press.
- Martínez Marín, E. (2007). *Diseño de pequeñas presas: bureau of reclamation*. Madrid: Bellisco.
- Various. (2022a, marzo). *Rubicon waer. flume gate. sizing and selection manual*. Australia.
- Various. (2022b, mayo). *Rubicon water. piko meter. sizing and selection*. Australia.
- Various. (2022c, abril). *Rubicon water. slip meter. sizing and selection manual*. Australia.
- Versteeg, H., y Malalasekera, W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method*. Harlow, Essex: Longman Scientific Technical.
- Water, G. M. (1900, enero). *Connections Project*. Goulburn Murray Water. Descargado 2023-06-11, de <https://www.g-mwater.com.au/customer-services-resources/projects/connectionsproject>
- White. (2021). *Fluid mechanics* (9.^a ed.). New York: McGraw-Hill Education.

A. Anexo A. Bibliografía complementaria. Estudios Existentes

Se ha realizado una búsqueda de estudios realizados similares y, al ser un modelo de compuerta muy concreto y único en el mercado, no existen estudios que analicen un caso igual, sin embargo, sí se han encontrado varios artículos académicos que estudian el flujo a través de una compuerta mural (*Sluice Gate*):

- M. Cihan Aydın, Ali Emre Ulu (2017) Numerical modelling of sluice gates with different baffle types under submerged flow conditions.
- Sahar Karami, Mohammad Mehdi Heidari, Mohammad Hossein Adib Rad (2019) Investigation of Free Flow Under the Sluice Gate with the Sill Using Flow-3D Model.
- Shamsa Basirat, Seyed Ali Akbar Salehi Neyshabouri (2017) Eulerian–Eulerian Model Application to Simulate Scouring Downstream of Sluice Gate.
- Ender Demirel (2015) Measured and simulated flow downstream of the submerged sluice gate.
- Mohamed Elgamal, Neveen Abdel-Mageed, Ahmed Helmy and Ashraf Ghanem (2017) Hydraulic performance of sluice gate with unloaded upstream rotor.
- Ludovic Cassan and Gilles Belaud (2012) Experimental and Numerical Investigation of Flow under Sluice Gates.

Se han encontrado otros artículos que no estudian específicamente el flujo en una compuerta de guillotina o mural, aun así, son artículos de interés ya que abordan simulaciones numéricas de flujos con problemáticas similares a la que se propone en este Trabajo:

- B. Iooss, C. Lhuillier, H. Jeanneau (2002) Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters: uncertainties due to flow profile and fluid turbulence
- Yaxia Lu, Xushu Sun (2021) Study on Water Flow Capacity and Related Parameters of Spillway Gate of Orifice Outflow Dam.
- Thulfikar Razzak Al-Husseini, Huda T. Hamad, Abdul-Sahib T. Al-Madhhachi (2020) Effects of an Upstream Sluice Gate and Holes in Pooled Step Cascade Weirs on Energy Dissipation.
- Ashkan Pilbala, Seyed Mohsen Sajjadi, Mahmood Shafai Bejestan (2020) Hydraulic performance of elliptical-LOPAC gate under submerged flow conditions.
- Alireza Khoshkonesh, Blaise Nsom, Farhad Bahmanpouri, Fariba Ahmadi Dehrashid, Atefeh Adeli (2021) Numerical Study of the Dynamics and Structure of a Partial Dam-Break Flow Using the VOF Method.

Todos estos estudios, a pesar de tener un claro interés científico no se han contemplado en las Referencias de este TFM ya que ninguno de los artículos expuestos, como se ha mencionado, se ajusta a la geometría de la compuerta estudio.

B. Anexo B. Código de Matlab ejemplo para la Configuración 1.1

El siguiente código toma como datos de partida el archivo C11.xlsx, este archivo se ha creado descargando en ANSYS el valor de velocidad (w) de cada uno de los 12 pares de transductores en el ancho (X) de la compuerta, y estos valores almacenados en cada columna en el orden Pla00, Pla01, Pla10, Pla 11, Pla20, Pla21, Pla30, Pla 31, Pla40, Pla41, Pla50 y Pla 51, ver Figura 19.

```

1
2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3 % Name: Analisis configuracion 1.1                               Author:Ignasi Pruna %
4 % 25/05/2023                                                    Last modification: 25/05/2023 %
5 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
6
7 % Borrado de variables, cierre de figuras y borrado de la ventana de
8 % comandos
9 clc
10 close all
11 clear
12
13 %Leer datos
14
15 fileName = 'C11.xlsx';
16
17 %Genera matriz de datos
18
19 A = readmatrix(fileName);
20 f = size(A);
21 f = f(2);
22
23 %Loop para plotear los resultados
24
25 y= A(:,1);
26
27 figure('Position',[1440,100,792,1238]) ;
28
29 for i=2:f
30     a=round(i/2-1.4);

```

```
31
32     if rem(i,2)==0
33         b=0;
34     else
35         b=1;
36     end
37
38     str = "Pla"+a+b;
39     x= A(:,i);
40     subplot((f-1)/2,2,f-i+1);
41     plot(x,y);
42     title(str,'interpreter','latex');
43     xlabel('Velocidad ($m/s$)','interpreter','latex');
44     ylabel('X (m)','interpreter','latex');
45     xlim([0,1.7]);
46     ylim([0,0.45]);
47     grid on;
48
49
50     %calculo de la media de la velocidad en cada PXX
51     M(i-1) = mean(A(:,i));
52
53 end
54 sgtitle('Perfil de velocidades en cada par de transductores. Configuracion
55         1.1','interpreter','latex')
56 ii=1;
57 for i=1:2:size(M,2)
58 MP(ii) = (M(i)+M(i+1))/2;
59 ii= ii + 1;
60 end
61
62 %Caudal calculado con velocidades medias
63
64 Q = sum(0.069 * 0.45 * MP)
```