

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
DE CARTAGENA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS  
Y DE INGENIERÍA DE MINAS



## MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Trabajo Fin de Máster

# ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE RESALTOS HIDRÁULICOS

*CRISTINA PEDREÑO AMADOR*

Dirigido por:

D. Luis G. Castillo Elsitdié

D. José M. Carrillo Sánchez

Doctores Ingenieros de Caminos, C. y P.

Cartagena, Septiembre 2019

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Introducción</b>	<b>6</b>
2.1	Labor experimental	6
2.2	Labor numérica	6
<b>3</b>	<b>Bases teóricas de flujo en canales abiertos</b>	<b>7</b>
3.1	Clasificación de flujos	7
3.2	Número de Reynolds	7
3.3	Número de Froude	9
3.4	Ecuación de Bernoulli	9
3.5	Principio de contorno	10
3.6	Energía específica	10
3.6.1	Principio del mínimo esfuerzo	12
3.7	Estructuras de control	13
3.7.1	Estructuras con flujo inferior	13
3.7.1.1	Compuertas de flujo inferior con nivel libre aguas arriba y descarga libre	13
3.8	El resalto hidráulico	18
3.8.1	Ecuación de Bélanger	20
3.9	Pérdida de energía y eficiencia	22
3.10	Longitud del resalto	23
3.11	Tipos de resaltos	26
3.12	Aplicaciones del resalto hidráulico	27
<b>4</b>	<b>Equipo e instrumentación utilizada</b>	<b>29</b>
4.1	Descripción del equipo de canal	29
4.2	Velocímetro Acústico Doppler	33
4.2.1	Componentes del instrumento	33
4.2.2	Funcionamiento de la sonda	35
4.3	Filtrado de datos	36
4.3.1	Problemática de la sonda (Acoustic Doppler Velocimeter, ADV) y necesidad de filtrado de datos	36
4.3.2	Pasos de un filtrado de datos	38
4.3.2.1	Detección	38
4.3.2.2	Reemplazo	38
4.3.3	Método del umbral espacio-estado, PSTM (Goring y Nikora, 2002)	39
4.3.4	Método del umbral espacio-estado, PSMT+C (Castillo, 2009)	40
4.4	Equipo informático y recopilación de datos	44
<b>5</b>	<b>Campaña experimental</b>	<b>45</b>
5.1	Posición de medida en los resaltos hidráulicos	45
5.2	Características de los resaltos analizados	45

<b>6</b>	<b><i>Introducción a la dinámica de fluidos computacional</i></b>	<b>47</b>
6.1	<b>Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional</b>	<b>48</b>
6.2	<b>Ventajas y restricciones de los modelos numéricos</b>	<b>49</b>
6.3	<b>Bases teóricas para la mecánica de fluidos computacional</b>	<b>49</b>
6.3.1	Sistemas y volúmenes de control	50
6.4	<b>Ecuación de conservación de la masa</b>	<b>51</b>
6.5	<b>Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento</b>	<b>51</b>
6.5.1	Ecuación de Euler	52
6.5.2	Ecuaciones de Navier-Stokes	53
6.5.3	Tensiones de Reynolds	53
6.5.4	Teorema del transporte de Reynolds	54
6.6	<b>Introducción a los modelos de turbulencia, usos y aplicación</b>	<b>55</b>
6.7	<b>Cascada de energía y escala de turbulencias</b>	<b>57</b>
6.7.1	Usos de los modelos de turbulencia	58
6.7.2	Modelos de longitud de mezcla de Prandtl	59
6.7.3	Simulación RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)	59
6.7.4	Modelos de turbulencia de dos ecuaciones	59
6.7.5	Modelo k- $\epsilon$	59
6.7.6	Modelo K- $\Omega$	60
6.7.7	Modelo Shear Stress Transport	61
6.7.8	Simulación de grandes remolinos (LES)	61
6.7.9	Simulación numérica directa	62
6.8	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b><i>Modelo numérico de un canal aplicando ANSYS CFX</i></b>	<b>63</b>
7.1	<b>Introducción a ANSYS 16.0</b>	<b>63</b>
7.2	<b>ANSYS Workbench</b>	<b>63</b>
7.2.1	ANSYS CFX	63
7.3	<b>Módulos de ejecución de ANSYS CFX</b>	<b>64</b>
7.3.1	Módulo preproceso	64
7.3.2	Módulo solver	65
7.3.3	Módulo postproceso	65
7.4	<b>Métodos de resolución numérica en ANSYS CFX, secuencia y estructura</b>	<b>65</b>
7.4.1	Método de los volúmenes finitos	66
7.4.2	Tipos de análisis	66
7.5	<b>Mallado del dominio de estudio</b>	<b>67</b>
7.5.1	Mallas estructuradas	68
7.5.2	Mallas no estructuradas	68
7.5.3	Calidad del mallado	68
7.6	<b>Condiciones de contorno del modelo numérico</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b><i>Simulación numérica del resalto hidráulico</i></b>	<b>70</b>
8.1	<b>Construcción de la geometría</b>	<b>70</b>
8.2	<b>Mallado del dominio</b>	<b>71</b>
8.3	<b>Expresiones</b>	<b>72</b>

8.4	Dominio y condiciones de contorno	72
8.5	Tipo de análisis	75
8.6	Condiciones iniciales a considerar	76
<b>9</b>	<b>Resultados experimentales</b>	<b>79</b>
9.1	Calado conjugado	79
9.2	Longitud del resalto	80
9.3	Pérdida de energía y eficiencia	82
9.4	<b>GRÁFICAS DE VELOCIDAD FRENTE A CALADO</b>	<b>84</b>
<b>10</b>	<b>Resultados numéricos</b>	<b>91</b>
10.1	Longitud del resalto para un mallado de 3 mm, simulado en régimen permanente y transitorio con distintos modelos de turbulencia (comparativa resultados experimentales)	91
10.2	Lámina libre para un mallado de 3 mm, simulado en régimen permanente y transitorio con distintos modelos de turbulencia (comparativa resultados experimentales)	94
10.3	<b>Secciones teóricas del resalto hidráulico para un mismo método de simulación y distintos tamaños de mallado</b>	<b>95</b>
10.3.1	Régimen permanente y modelo de turbulencia K- $\epsilon$	95
10.3.2	Régimen permanente y modelo de turbulencia Shear Stress Transport	102
10.3.3	Régimen transitorio y modelo de turbulencia K-Épsilon	109
10.4	<b>Secciones resalto hidráulico completo para un de mallado de 3 mm, simulado en régimen permanente y transitorio con distintos modelos de turbulencia (comparativa con resultados experimentales)</b>	<b>116</b>
10.5	Energía cinética	121
<b>11</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>123</b>
	<b>ANEXO 1.</b>	<b>125</b>
	<b>RESULTADOS DE FILTRADO A PARTIR DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO</b>	<b>125</b>

# 1 Objetivos

---

Los principales objetivos de este Trabajo Fin de Máster, además de la puesta en práctica de los conocimientos adquiridos durante el Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, son:

- Caracterización de resaltos hidráulicos.
- Conocimiento y manejo de una de las principales técnicas actuales de instrumentación de medida de velocidades instantáneas, denominada Acoustic Doppler Velocimeter (ADV).
- Obtención de datos de velocidades instantáneas en el seno de resaltos hidráulicos, aguas abajo de una compuerta plana, con instrumentación ADV, para su posterior análisis y validación mediante algoritmos de filtrado.
- Aplicación de un modelo de simulación numérica tridimensional con metodología CFD (Computational Fluids Dynamics) en una estructura hidráulica (canal). Este modelo debe ser validado y calibrado de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en laboratorio.

## 2 Introducción

---

Este Trabajo Fin de Máster recoge estudios de investigación de tipo teórico, experimental y numérico.

### 2.1 Labor experimental

La labor experimental llevada a cabo durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster ha consistido en la medición de los perfiles de velocidad existentes en el resalto hidráulico que se produce para distintos caudales, aberturas de compuerta y números de *Froude*.

La medición de velocidades instantáneas mediante instrumentación ADV constituye una alternativa válida frente a equipos basados en la tecnología láser PIV (*Particle Image Velocimetry*), siendo el coste del PIV unas diez veces superior al del ADV.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta los diferentes fenómenos que interfieren en la señal; siendo uno de los objetivos del proyecto, eliminar dichas perturbaciones a través de un filtrado de datos.

En esta ocasión se han analizado seis resaltos hidráulicos. Finalizadas todas las mediciones, se ha realizado una comparación teórico-práctica de los resultados con trabajos ya afianzados.

### 2.2 Labor numérica

La labor numérica que se recoge en este Trabajo Fin de Máster consiste en la simulación numérica de los resaltos hidráulicos analizados en laboratorio, para su posterior análisis y comparación con los resultados obtenidos experimentalmente.

La herramienta empleada para la simulación numérica de los resaltos ha sido ANSYS CFX, un software de análisis y simulación CFD (Computational Fluids Dynamics).

Para poder realizar la simulación numérica de los resaltos, se ha creado un modelo numérico, tomando como base las condiciones aguas arriba y aguas abajo del flujo, conocidas por su medición en laboratorio. Creado el modelo, mediante la aplicación de distintos tamaños de mallado y métodos de cálculo, este ha sido calibrado. Una vez calibrado, se ha procedido a la extracción de los resultados para su análisis y comparación con los valores de laboratorio.

# 3 Bases teóricas de flujo en canales abiertos

---

## 3.1 Clasificación de flujos

La clasificación general del tipo de flujo en canales está basada en el cambio de calado respecto al tiempo y al espacio. Los tipos de flujos se pueden clasificar en:

- **Flujo permanente:** Ocurre cuando el calado del flujo no cambia o se supone constante durante el tiempo considerado.
  - **Flujo uniforme:** El flujo uniforme es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos. El calado del flujo es el mismo para cada sección del canal, siendo paralelas la línea de energía, la línea de lámina libre y la solera del canal.
  - **Flujo variado:** El calado del flujo varía en cada sección del canal. Este flujo variado, a su vez, se divide en:
    - **Flujo gradualmente variado:** Flujo que ocurre cuando la variación de calado se produce de forma progresiva. En él se desarrollan las conocidas *curvas de remanso*.
    - **Flujo espacialmente variado:** Flujo permanente, pero no uniforme, que se presenta si se agrega o extrae agua a lo largo del canal.
    - **Flujo rápidamente variado:** Se da cuando el cambio de calado se produce de forma brusca en longitudes relativamente cortas. En esta clasificación se engloba el fenómeno hidráulico conocido como *resalto hidráulico*.
- **Flujo no permanente o transitorio:** El flujo es no permanente si el calado cambia con el tiempo. Los tipos de flujos no permanentes que se pueden desarrollar son los mismos que para un Flujo Permanente, a excepción del Flujo Uniforme que no existe en régimen transitorio.

## 3.2 Número de Reynolds

El número de Reynolds (Reynolds, 1883),  $R_e$ , es un parámetro adimensional que determina el régimen de movimiento. Este depende de la velocidad del fluido, del diámetro de tubería, o diámetro equivalente si la conducción no es circular, y de la viscosidad cinemática o, en su defecto, densidad y viscosidad dinámica.

El número de Reynolds se obtiene como:

$$R_e = \frac{\rho v_s R}{\mu} \quad (3.1)$$

O equivalentemente:

$$R_e = \frac{v_s R}{\nu} \quad (3.2)$$

siendo:

- $v$ , velocidad media del flujo en la sección transversal.
- $\rho$ , densidad del flujo.
- $\mu$ , viscosidad dinámica del fluido.
- $R$ , radio hidráulico (área mojada/perímetro mojado).
- $\nu$ , viscosidad cinemática del fluido (para agua a 20°C,  $1.06 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s)

El número de Reynolds relaciona los efectos de inercia (masa y velocidad) con los efectos viscosos. Cuando la velocidad de un fluido es alta, los efectos de inercia son dominantes y el régimen tiende a hacerse turbulento. Por el contrario, cuando los efectos dominantes son los viscosos, el régimen es laminar y el comportamiento del fluido es regular.

Así, para flujos en canales abiertos, el número de Reynolds nos permite distinguir si el flujo circulante es laminar o turbulento. La clasificación en función del número de Reynolds es la siguiente:

- $R_e < 1000$ , *flujo laminar*.
- $1000 < R_e < 2000$ , *flujo en transición*.
- $R_e > 2000$ , *flujo turbulento totalmente desarrollado*.

### 3.3 Número de Froude

El efecto de la gravedad sobre el estado del flujo viene definido por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación está definida por el número de *Froude*, siendo para canales rectangulares:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad (3.3)$$

donde:

- $v$ , velocidad media del flujo.
- $g$ , aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- $y$ , calado.

Así, el número de *Froude* indica qué tipo de flujo es aquel con el que estamos trabajando:

- $Fr < 1$ , flujo subcrítico (lento).
- $Fr = 1$ , flujo crítico.
- $Fr > 1$ , flujo supercrítico (rápido).

### 3.4 Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli se deduce haciendo uso de la ecuación de Newton y la ecuación de Euler. Para flujo permanente y uniforme se tiene (Figura 3.1):

$$H = \frac{\alpha \cdot v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + z^* \quad (3.4)$$

siendo:

- $H$ , energía total sobre el nivel de referencia.
- $\alpha$ , coeficiente de Coriolis.
- $v$ , velocidad media del flujo.
- $P$ , presión hidrostática a la que está sometida el fluido.
- $\gamma$ , peso específico del fluido.

- $z^*$ , altura de la solera respecto al nivel de referencia.

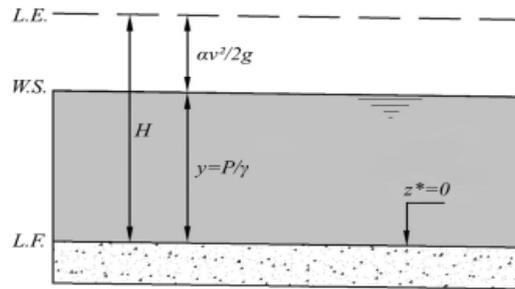


Figura 3. 1. Variables canal abierto. (Castillo,2013)

El coeficiente de corrección de la energía cinética oscila entre  $\alpha = 1.05 - 1.15$  y se toma como 1 para el diseño hidráulico general.

### 3.5 Principio de contorno

Cualquier fluido en contacto con un contorno posee la misma velocidad que este. La distribución de velocidades llega al fondo con un ángulo distinto de 90 grados debido a la existencia de un valor finito de  $\tau$  (Figura 3.2), siendo  $\tau$  el rozamiento, el cual se define como la resistencia que ofrece el contorno sólido al movimiento del fluido.

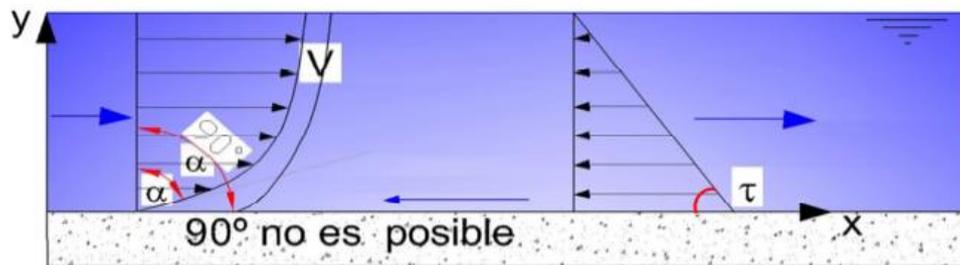


Figura 3. 2. Distribución de velocidades. (Castillo, 2013)

### 3.6 Energía específica

El concepto de energía específica deriva de la ecuación de Bernoulli. Esta se define como la energía por peso de agua, en cualquier sección de un canal, medida con respecto al fondo o solera del mismo.

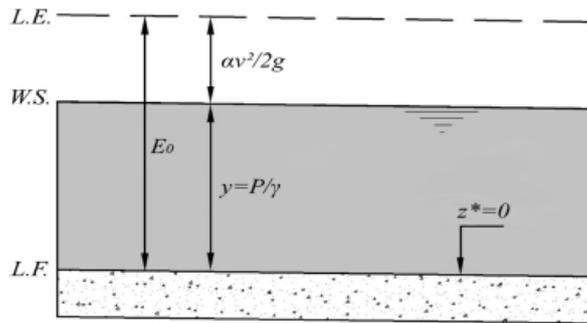


Figura 3. 3. Variables energía específica canal abierto. (Castillo, 2013)

Así, la energía específica viene dada como:

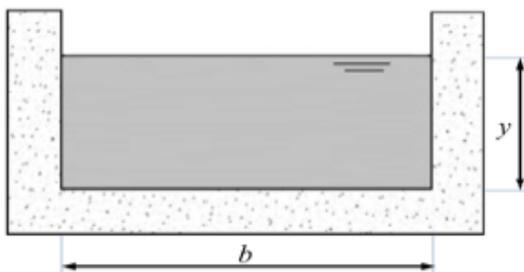
$$E = y + \frac{\alpha \cdot v^2}{2g} \quad (3.5)$$

siendo:

- $\frac{\alpha \cdot v^2}{2g}$ , la carga de velocidad.
- $y$ , la carga de presión.

Para canales rectangulares, haciendo uso de la ecuación de la continuidad y definiendo el caudal específico como  $q = \frac{Q}{b}$ , se obtiene:

$$Q = v \cdot A = v \cdot b \cdot y; \quad (3.6)$$



$$q = \frac{Q}{b} = v \cdot y; \quad (3.7)$$

$$v = \frac{q}{y} \quad (3.8)$$

Figura 3. 4. Sección canal rectangular.

La ecuación de la energía específica, para un caudal constante, permite calcular el calado del fluido y en un canal a partir del dato de energía específica y viceversa.

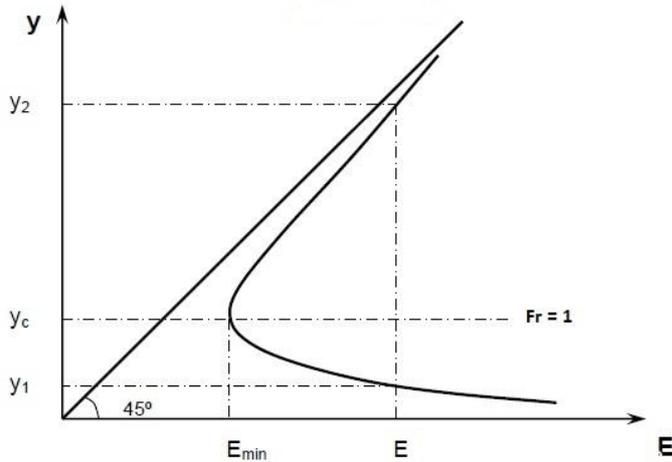


Figura 3. 5. Parámetros tipo de flujo para  $q = cte$

- $Fr < 1$  Régimen subcrítico o régimen lento.
- $Fr = 1$  Régimen crítico o de mínima energía.
- $Fr > 1$  Régimen supercrítico o régimen rápido.

Se observa que, para una cierta energía específica ( $E$ ) por encima de un mínimo, existen dos profundidades ( $y$ ) alternativas. Por su parte, para cada caudal  $q$ , existe una profundidad  $y$  que hace que la energía específica del canal sea mínima  $E_{min}$ , dicha profundidad se denomina calado crítico  $y_c$ .

### 3.6.1 Principio del mínimo esfuerzo

En canales rectangulares, es posible transportar un caudal  $q$  con un mínimo de energía a través del calado crítico  $y_c$ . Así, sabiendo que:

$$E_0 = \frac{q^2}{2gy^2} + y \quad (3.9)$$

Y considerando que  $\frac{dE_0}{dy} = 0$ , se obtiene:

$$\frac{-2y_c^{-3}}{2g} + 1 = 0 \quad (3.10)$$

siendo:

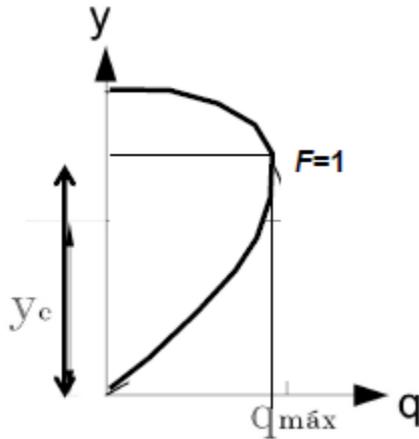
- $E_0$ , energía inicial.
- $q$ , caudal constante.
- $y$ , calado del agua ( $y_c$ , calado crítico)

Resulta:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (3.11)$$

siendo  $y_c$  el calado crítico. Asociada a esta profundidad crítica aparecen la energía mínima ( $E_{min}$ ):

$$E_{min} = \frac{3}{2}y_c \quad (3.12)$$



- $Fr < 1$  Régimen subcrítico o régimen lento.
- $Fr = 1$  Régimen crítico o de mínima energía.
- $Fr > 1$  Régimen supercrítico o régimen rápido.

Figura 3. 6. Parámetros tipo de flujo para  $H = cte$ .

## 3.7 Estructuras de control

Se define como estructura de control hidráulico aquella cuya función es presentar un obstáculo al libre paso del agua, con el consiguiente embalse aguas arriba de la misma, y el aumento de la velocidad aguas abajo.

Las estructuras de control hacen que el agua pase por calado crítico, independizando el cálculo de las curvas de remanso aguas arriba y aguas abajo.

Existen estructuras de control hidráulico con flujo inferior y estructuras con flujo superior. Este trabajo se va a centrar en las estructuras con flujo inferior pues la descarga se produce mediante una compuerta vertical. Además, la descarga estudiada será libre, pues no se trabaja con resaltos hidráulicos sumergidos.

### 3.7.1 Estructuras con flujo inferior

#### 3.7.1.1 Compuertas de flujo inferior con nivel libre aguas arriba y descarga libre

La descarga bajo una compuerta puede ser libre o sumergida. La descarga libre, objeto de estudio en este Trabajo, se caracteriza por un chorro que fluye por debajo de la compuerta. Dicho chorro está sujeto a la condición de borde *presión = presión atmosférica*. Esta condición conduce a que el coeficiente de contracción  $C_c$  sea dependiente del número de *Froude*. Para números de *Froude* superiores a diez, el  $C_c$  ya es independiente de  $Fr$ , y toma valores que corresponde a la condición de borde  $V = cte$  a lo largo del chorro. Los datos de la Figura 3. 7 provienen de una investigación basada en la teoría potencial (Rouvé Khader, 1969) y están libres de la influencia de la viscosidad. Estos valores concuerdan mejor con las relaciones en prototipos o en la naturaleza, ya que en esos casos se presentan números de Reynolds muy grandes.

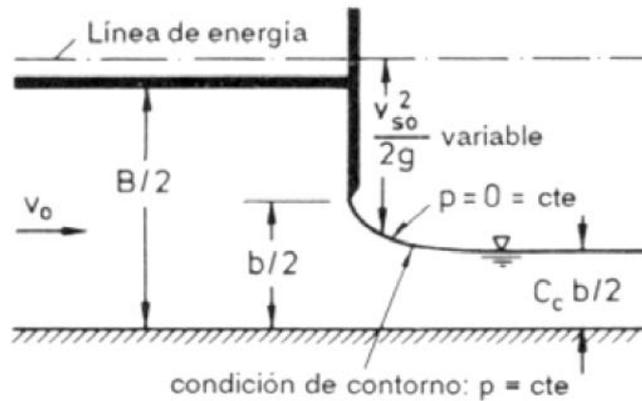


Figura 3. 7. Condiciones de contorno de la superficie del chorro. (Ven Te Chow, 2000)

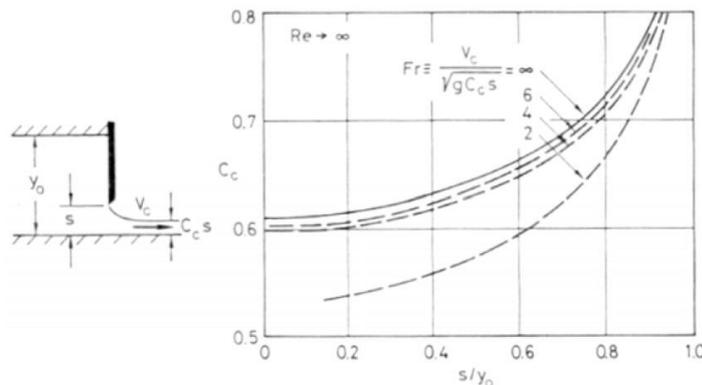


Figura 3. 8. Coeficiente de contracción en una compuerta de borde delgado, para descarga libre sobre fondo horizontal. (Condiciones de flujo ideal). (Ven Te Chow, 2000)

Si se compara la red de flujo para el flujo inferior bajo una compuerta (Figura 3.9) con la de una tobera rectangular con  $F \rightarrow \infty$  (chorro con eje rectilíneo), se observa una gran similitud. Sin embargo, son tres las diferencias destacables:

1. La condición de borde a lo largo del chorro para la compuerta puede ser diferente a la de la tobera.
2. El contorno superior sólido aguas arriba de la compuerta se ha sustituido por una superficie libre.
3. Fondo sólido donde antes se encontraba el plano axial del chorro.

La existencia de la segunda diferencia significa una interrelación entre la abertura relativa de compuerta ( $s/y_0$ ) y el número de Froude ( $Fr$ ). Así, el número de Froude deja de ser independiente pues el coeficiente  $C_c$  depende de la abertura relativa, siempre que se supongan condiciones ideales.

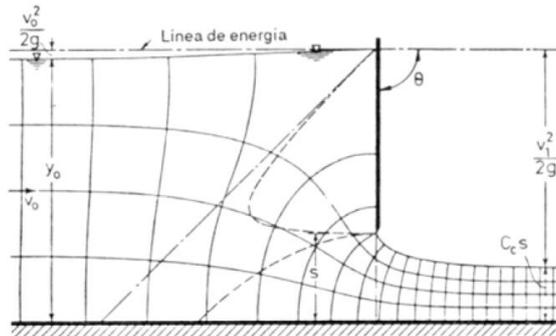


Figura 3. 9. Flujo libre de salida y distribución de presiones en la salida. (Ven Te Chow, 2000)

En la Figura 3.10, se define el coeficiente de descarga del siguiente modo:

$$C_q = \frac{q}{s\sqrt{2gy_0}}; q = \frac{Q}{b} \quad (3. 13)$$

En esta ecuación, se sustituye en la ecuación de definición  $(C_q = \frac{q}{L\sqrt{2g\Delta h}})$  el calado  $\Delta h$  por  $y_0$ , y la abertura de compuerta  $s$  por la longitud  $L$ .

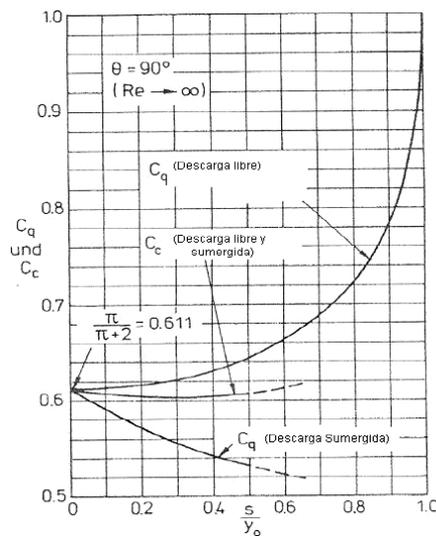


Figura 3. 10. Cq y Cc bajo compuerta en condiciones ideales. (Ven Te Chow, 2000).

Las condiciones en las que se basa la figura anterior se asemejan mucho a la mayoría de casos prácticos. Sin embargo, en las investigaciones con modelos reducidos en laboratorio no se puede dejar de considerar el efecto del número de Reynolds.

Si no se considera esta influencia, haciendo uso de las ecuaciones de la energía y de la continuidad, se obtiene que:

$$C_q = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c s/y_0}} \quad (3. 14)$$

De este modo se obtienen las dependencias de los coeficientes  $C_q$  y  $C_c$ :

$$C_q = C_q\left(\frac{s}{y_0}, \theta\right); C_c = C_c\left(\frac{s}{y_0}, \theta\right) \quad (3.15)$$

Pajer (1973) determinó esta relación para  $\theta = 90^\circ$ . Representando sus resultados en la Figura 3.10, se obtiene un coeficiente de descarga  $C_c = 0.611$  para un amplio intervalo de valores de abertura relativa  $s/y_0$ .

Se observa que para una abertura mínima el coeficiente de descarga  $C_q$  toma el mismo valor que el de contracción  $C_c$ , ( $C_q = C_c = 0.611$ ).

El valor extremo  $s/y_0 = 1$  corresponde al flujo con compuerta totalmente abierta. En este caso el flujo bajo la compuerta se transforma en un flujo con calado crítico  $y_0 = y_c$  debido a que no está sumergido. El coeficiente de descarga resulta para este caso de 1.

De acuerdo con la Figura 3.11, estos resultados únicamente son válidos para flujos planos bidimensionales; es decir, para canales muy amplios  $b \gg s$ .

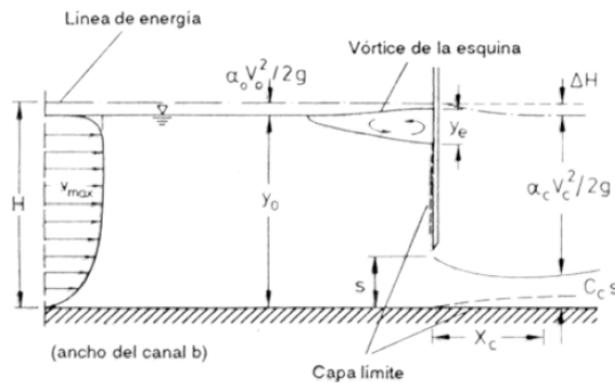


Figura 3.11. Flujo bajo una compuerta con descarga libre. (Ven Te Chow, 2000)

Mediante la ecuación de la energía, puede demostrarse que el caudal a través de una compuerta de flujo inferior viene dado como:

$$Q = CLh \sqrt{2g \left( y_1 + \alpha \frac{v_1^2}{2g} \right)} \quad (3.16)$$

siendo:

- $C$ , coeficiente de descarga.
- $L$ , longitud de la compuerta.
- $h$ , abertura de la compuerta.
- $y_1$ , calado del flujo aguas arriba.
- $\alpha \frac{v_1^2}{2g}$ , altura de velocidad del flujo de aproximación.

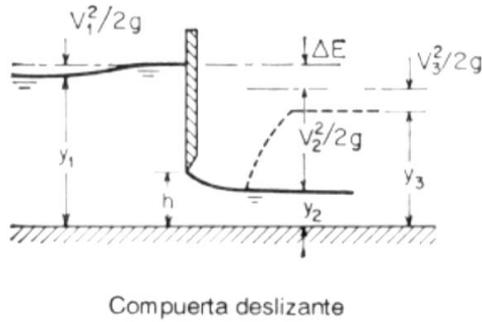


Figura 3. 12. Compuerta con flujo inferior. (Ven Te Chow, 2000)

Para casos prácticos, el término de la altura de velocidad puede omitirse, incluyéndose su efecto en el coeficiente de descarga  $C$ . De este modo, la expresión queda del siguiente modo:

$$Q = CLh\sqrt{2gy_1} \quad (3. 17)$$

siendo  $C$  un coeficiente que depende de la geometría de la estructura y de los calados aguas arriba y aguas abajo. La forma de esta ecuación es igual para flujos libres o sumergidos.

Para la compuerta plana deslizante, en la Figura 3.13, se muestran las curvas que representan el valor de  $C$ , que Henry determinó experimentalmente. La línea punteada  $A$  representa el resultado obtenido mediante la ecuación con base en el principio de la energía; la línea punteada  $B$  se obtiene por el principio de momentum. El valor de  $F_0$  es el número de *Froude* de flujo a través de la abertura de la compuerta.

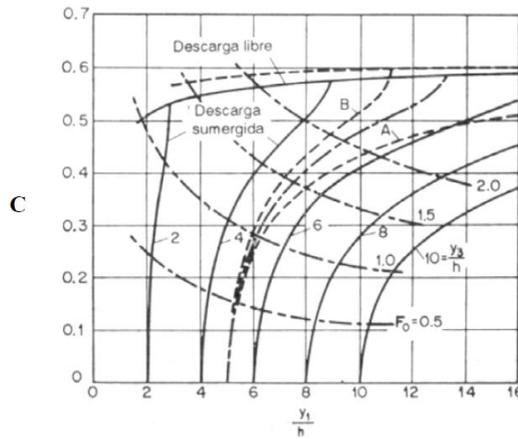


Figura 3. 13. Coeficientes de descarga para compuertas deslizantes verticales. (Ven Te Chow, 2000)

### 3.8 El resalto hidráulico

El resalto hidráulico es el fenómeno natural mediante el que se pasa de flujo supercrítico a flujo subcrítico (Figura 3.14).

Este se da cuando la *ecuación de momentum* (3.18) se iguala en los calados inicial y final ( $M_1 = M_2$ ). Por su parte, si  $M_1 > M_2$ , el resalto se desplaza hacia aguas abajo; y si  $M_1 < M_2$ , este se desplaza hacia aguas arriba.

$$\sum F_{EXT} = \beta \rho \Delta [QV] \tag{3.18}$$

siendo:

- $\beta$ , coeficiente de Boussinesq.
- $\rho$ , densidad del agua.
- $Q$ , caudal.
- $V$ , velocidad.

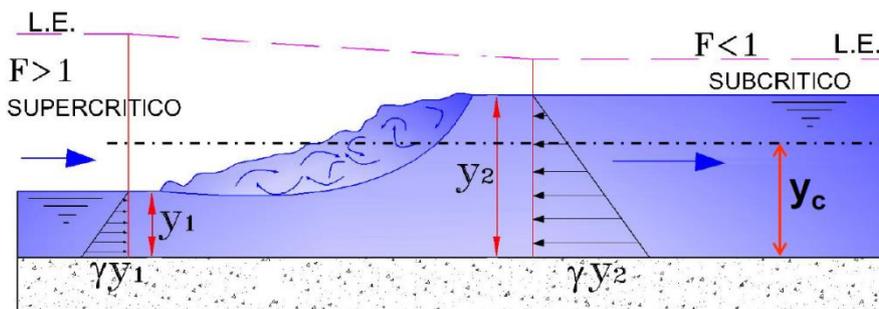


Figura 3. 14. Esquema gráfico del resalto hidráulico. (Castillo, 2013)



Figura 3. 15. Resalto hidráulico obtenido en laboratorio

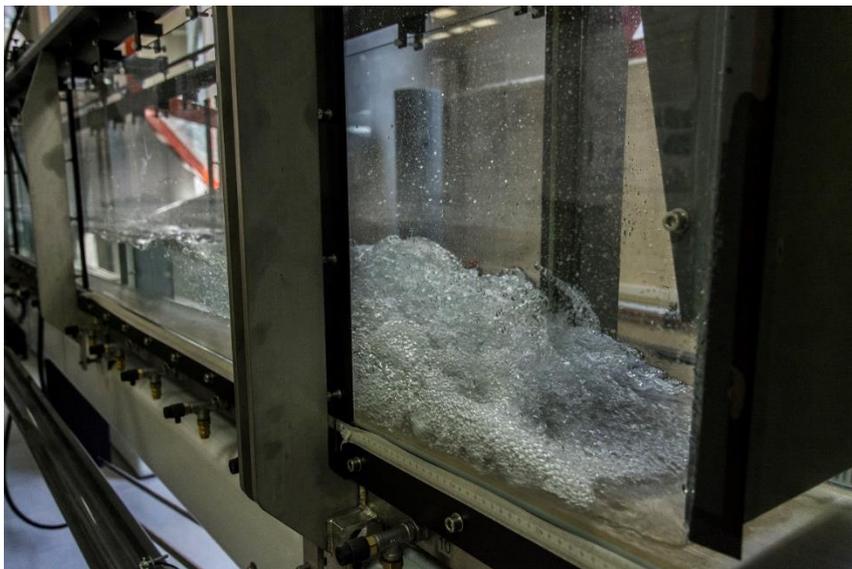


Figura 3. 16. Resalto hidráulico obtenido en laboratorio

Para un canal con pendiente horizontal, numerando las secciones iniciales y finales como 1 y 2, respectivamente, se obtiene que si los momentos son iguales:

$$M_1 = M_2 \tag{3. 19}$$

Entonces,

$$\frac{q^2}{gA_1} + z_1A_1 = \frac{q^2}{gA_2} + z_2A_2 \tag{3. 20}$$

Donde:

- $M$ , *momentum* o cantidad de movimiento.
- $z$ , distancia desde la superficie libre a los centroides de las respectivas áreas.
- $A$ , áreas hidráulicas.

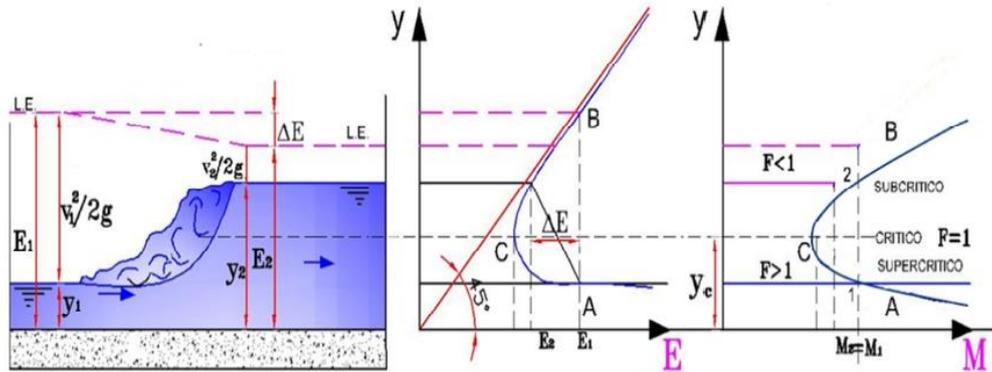


Figura 3. 17. Variables, curva energía, curva momentum del resalto hidráulico. (Castillo, 2013)

Cuando se grafica los calados del flujo contra  $M$ , se genera una *curva de momentum* que tiene dos ramas. La rama AC (tramo inferior) que se aproxima asintóticamente al eje horizontal y una rama CB (tramo superior) se extiende indefinidamente hacia arriba y a la derecha. Así, para un valor dado de  $M$ , la *curva de momentum* determina dos posibles calados de flujo.

Los calados a que hace referencia se denominan calados conjugados o alternos del resalto hidráulico.

### 3.8.1 Ecuación de Bélanger

Según Bélanger (1828), bajo comprobación experimental de Peterka (1964), un resalto hidráulico, en un canal rectangular de pendiente horizontal para un caudal constante, se forma si el número de Froude aguas arriba del flujo ( $Fr$ ), el calado del flujo aguas arriba o supercrítico ( $y_1$ ) y el calado aguas abajo o subcrítico ( $y_2$ ) satisfacen la siguiente ecuación:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr^2} - 1 \right) \quad (3.21)$$

Como se puede ver, la ecuación de Bélanger relaciona los tirantes conjugados de un resalto hidráulico para el número de Froude aguas arriba del mismo.

Cabe destacar que la ecuación de conservación de la energía no es aplicable al resalto hidráulico, debido a la gran pérdida de energía que se produce por la turbulencia del flujo. Por esto para la deducción de la *Ecuación de Bélanger*, se hace uso de la *Ecuación de Cantidad de Movimiento*.

$$\Sigma F_{ext} = \beta \cdot \rho \cdot \Delta[Q \cdot V] \quad (3.22)$$

siendo:

- $\beta$ , coeficiente de Boussinesq.
- $\rho$ , densidad del agua.
- $q$ , caudal.
- $v$ , velocidad.

El coeficiente de Boussinesq será igual a la unidad, por ser un tramo corto en el que se desarrolla el fenómeno y al considerar uniforme la distribución de velocidad en las secciones supercrítica y subcrítica.

$$\beta = 1 \quad (3.23)$$

Tomando como base lo mencionado anteriormente, la ecuación de Bélanger para un canal rectangular se obtiene del siguiente modo:

$$\Sigma F_{ext} = \beta \cdot \rho \cdot \Delta[Q \cdot V] \quad (3.24)$$

$$P_1 - P_2 = \beta \cdot \rho \cdot \Delta[Q \cdot V] \quad (3.25)$$

$$\left(\frac{1}{2}\rho g y_1^2 - \frac{1}{2}\rho g y_2^2\right)B = \rho V_1 y_1 B(V_2 - V_1) \quad (3.26)$$

De la ecuación de la continuidad también conocemos que:

$$q = V_1 y_1 = V_2 y_2 \quad (3.27)$$

Combinando las dos últimas ecuaciones, obtenemos que:

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right) - 2Fr^2 = 0 \quad (3.28)$$

Si de la expresión anterior se despeja la relación entre el calado supercrítico y subcrítico, obtenemos la antes citada ecuación de Bélanger:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr^2} - 1 \right) \quad (3.29)$$

Esta ecuación tiene validez cuando el caudal es constante y la pendiente horizontal.

García (2008) y Vicente (2008) demostraron que, para la relación del calado inicial y final en flujo no desarrollado y valores medios del número de *Froude*, era adecuado el empleo de la relación de los calados conjugados dada por la *Ecuación de Bélanger*.

### 3.9 Pérdida de energía y eficiencia

La pérdida de energía y la eficiencia son características elementales del resalto hidráulico. Por ello, en muchas ocasiones la principal función del resalto hidráulico es la disipación de energía. En un canal horizontal, la variación de energía se expresa como:

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (3.30)$$

siendo:

- $E_1$ , la energía específica en la sección inicial del resalto.
- $E_2$ , la energía específica en la sección final del resalto.

La pérdida de energía se calcula a partir de la ecuación de la energía si suponemos  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ . Por tanto:

$$\left( \frac{q^2}{2gy_1^2} + y_1 \right) = \left( \frac{q^2}{2gy_2^2} + y_2 \right) + \Delta E \quad (3.31)$$

Con lo que se puede obtener:

$$\frac{\Delta E}{y_1} = \frac{\left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{\frac{4y_2}{y_1}} \quad (3.32)$$

Comúnmente, la pérdida de energía se expresa como una pérdida relativa ( $\Delta E/y_1$ ) o como una eficiencia ( $E_2/E_1$ ).

Para un canal rectangular horizontal, la pérdida de energía se define del siguiente modo:

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_2y_1} \quad (3.33)$$

Por tanto,

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{2 - 2\left(\frac{y_2}{y_1}\right) + Fr_1^2 \left[ 1 - \left(\frac{y_1}{y_2}\right)^2 \right]}{2 + Fr_1^2} \quad (3.34)$$

Y la eficiencia energética resulta:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8Fr_1^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4Fr_1^2 + 1}{8Fr_1^2(2 + Fr_1^2)} \quad (3.35)$$

Como la pérdida relativa, la eficiencia, la altura relativa y las profundidades inicial y secante relativa de un resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal son funciones de  $F_1$ , pueden graficarse contra  $F_1$ , dando como resultado un conjunto de curvas características (Figura 3.18).

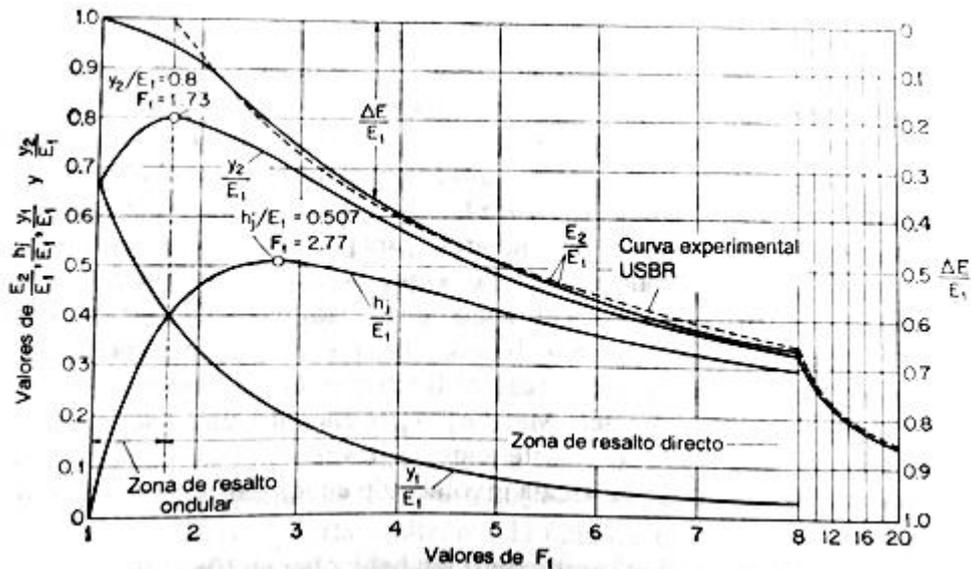


Figura 3. 18. Disipación de energía de acuerdo a U. S Bureau of Reclamation. (Naudascher, 2001)

En referencia a estas curvas, cabe destacar:

1. La máxima altura relativa  $h_1/E_1$  es 0.507, lo cual ocurre cuando  $F_1 = 2.77$
2. La máxima profundidad relativa  $y_2/E_1$  es 0.8, lo cual ocurre en  $y_1/E_1 = 0.4$  y  $F_1 = 1.73$ . Los experimentos han demostrado que la transición desde un resalto ondulante a uno directo ocurre aproximadamente en el punto  $F_1 = 1.73$ .
3. Cuando  $F_1 = 1$ , el flujo es crítico y  $y_1 = y_2 = 2/3 E_1$ .
4. Cuando  $F_1$  aumenta, los cambios en todas las relaciones características se vuelven graduales.

Las curvas características darán al diseñador una idea general del rango de condiciones en las cuales la estructura debe operarse.

### 3.10 Longitud del resalto

La longitud del resalto hidráulico  $L_j$  se define como la distancia existente desde la cara frontal del resalto hasta un punto inmediato sobre la superficie del flujo aguas abajo de la onda asociada al resalto. Aunque la longitud de un resalto hidráulico es un parámetro crucial en el diseño, por regla general esta no puede estimarse de consideraciones teóricas; pues los resultados de algunas investigaciones experimentales han arrojado resultados contradictorios en ciertos sentidos.

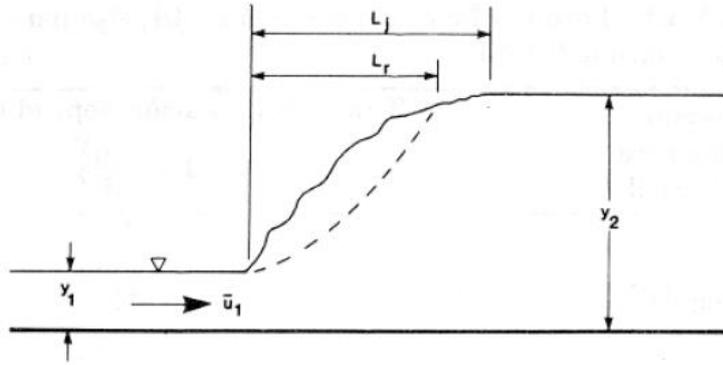


Figura 3. 19. Esquema de la longitud del resalto hidráulico y onda. (Molina, 2010)

Los datos experimentales sobre la longitud del resalto pueden graficarse mediante número de Froude  $F_1$  contra una relación adimensional  $L/(y_2-y_1)$ ,  $L/y_1$  o  $L/y_2$ . La gráfica  $F_1$  versus  $L/y_1$  es tal vez la mejor, debido a que la curva resultante es la que mejor define los datos. Sin embargo, para propósitos prácticos, la gráfica  $F_1$  versus  $L/y_2$  es conveniente debido a que la curva resultante muestra la regularidad de una parte plana para el rango de los resaltos hidráulicos bien establecidos. La curva de la Figura 3.20 fue elaborada en base a los datos de seis canales de prueba y se desarrolló antes todo para canales rectangulares.

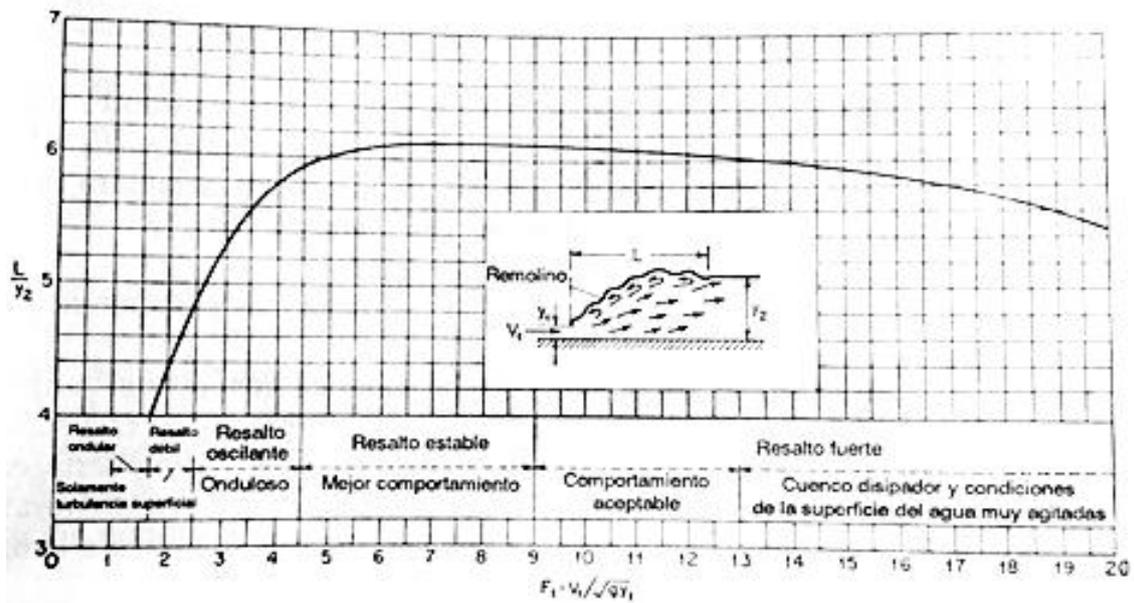


Figura 3. 20. Longitud en términos de la profundidad  $y_2$  de resaltos en canales horizontales, con base del U. S. Bureau of Reclamation). (Ven Te Chow,2000)

Por otro lado, Márquez (2006) comprobó que cuando el resalto hidráulico se inicia a una distancia desde el pie de compuerta de unas 30 veces el calado contraído, se produce un flujo totalmente desarrollado. Este estudio se ha efectuado a pie de compuerta, por lo que el flujo ha sido en todo momento no desarrollado.

En este tipo de flujos, *García (2008)* y *Vicente (2008)* comprobaron que la fórmula de *Silvester (1964)* se ajusta adecuadamente a los resultados obtenidos en el canal del laboratorio, por lo que será una de las formulaciones empleadas para el cálculo de la longitud teórica de los resaltos analizados:

$$\frac{L_j}{y_1} = 9,75(Fr_1 - 1)^{1,01} \quad (3.36)$$

El esquema de la Figura 3.21 muestra, además de la longitud del resalto hidráulico  $L$ , la longitud  $L_D$  del remolino superior del mismo ( $L_D < L$ ) y la distancia  $L^*$  desde el pie del salto hidráulico hasta una determinada sección transversal aguas abajo ( $L^* > L$ ), en la que ha desaparecido el efecto del resalto hidráulico sobre la *distribución* de velocidades.

La longitud del remolino superior crece desde  $L_D \cong 0.4L$  para  $F1 = 3$  hasta  $L_D \cong 0.7L$ , para  $F1=9$  y es, al igual que  $L$ , prácticamente independiente de las condiciones del flujo de aproximación. Según las investigaciones de *Leutheusser y Kartha (1972)* la relación  $L^*/y_2$  en el resalto hidráulico aguas abajo de una compuerta es alrededor de un 25% menor que la de un resalto hidráulico similar aguas abajo de una rápida.

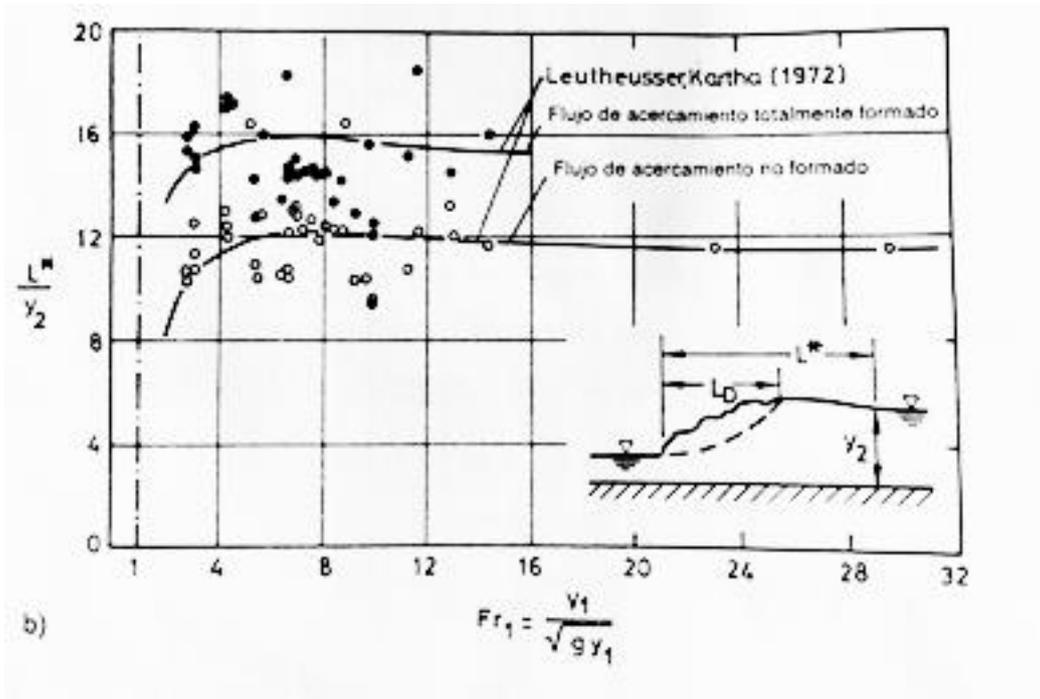


Figura 3. 21. Parámetros característicos del resalto hidráulico en un canal rectangular. (Naudascher, 2001)

### 3.11 Tipos de resaltos

Los resaltos hidráulicos en canales horizontales se clasifican en distintas clases. Según los estudios del U.S Bureau of Reclamation, estos pueden clasificarse según su número de *Froude* del flujo entrante. Así:

- Para  $Fr = 1$ , el flujo es crítico y no se desarrolla el resalto.
- Para  $1 < Fr < 1.7$ , la superficie de agua muestra ondulaciones y se produce el *resalto ondulante* (Figura 3.22).



Figura 3. 22. Esquema del resalto ondulante. (Ven Te Chow,2000)

- Para  $1.7 < Fr < 2.5$ , se desarrollan una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, siendo esta uniforme aguas abajo. La velocidad a través de la sección es razonablemente uniforme y la pérdida de energía es baja. Se presenta entonces el *resalto débil* (Figura 3.23).

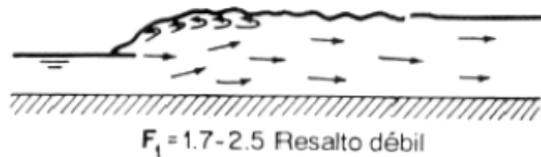


Figura 3. 23. Esquema del resalto débil. (Ven Te Chow, 2000)

- Para  $2.5 < Fr < 4.5$ , existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, muy común en canales, que puede viajar a lo largo de varios kilómetros causando daños a planicies de inundación y escolleras de protección. Se produce entonces el *resalto oscilante* (Figura 3.24).



Figura 3. 24. Esquema del resalto oscilante. (Ven Te Chow, 2000)

- Para  $4.5 < Fr < 9.0$ , la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo, ocurren prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor. La disipación de energía varía de 45% a 70%. Se presenta entonces el *resalto estable* (Figura 3.25).

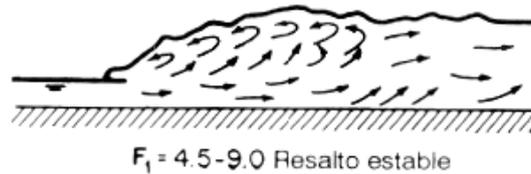


Figura 3. 25. Esquema del resalto estable. (Ven Te Chow, 2000)

- Para  $Fr > 9.0$  y mayores, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que discurren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Se produce entonces el *resalto fuerte* (Figura 3.26)



Figura 3. 26. Esquema de resalto estable. (Ven Te Chow, 2000)

Se debe recalcar que los rangos del número de *Froude* dados arriba para los diferentes tipos de resalto no están claramente demarcados, sino que se traslapan en cierto modo según las condiciones locales.

### 3.12 Aplicaciones del resalto hidráulico

Las aplicaciones prácticas del resalto hidráulico son numerosas en el ámbito de flujo de canales abiertos. A continuación, se citan algunas de ellas:

- La disipación de la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas, previniendo de esta manera la socavación aguas abajo de las estructuras.
- Aumentar el caudal aguas abajo de una compuerta deslizante manteniendo alejada la profundidad de aguas abajo, debido a que la altura efectiva se reducirá si la profundidad de aguas abajo ahoga el resalto.

- La recuperación de altura o aumento del nivel del agua en el lado de aguas abajo de una estructura de medición y para mantener un nivel alto del agua en el canal de irrigación o de cualquier otra estructura para distribución de aguas.
- La mezcla de sustancias químicas usadas para la purificación o el tratamiento de agua.
- La identificación de condiciones especiales de flujo, como la existencia del flujo supercrítico o la presencia de una sección de control para la medición de la relación efectividad-costos del flujo mediante una estación de aforo.
- Incremento en el peso sobre la zona de aguas abajo de la estructura y reducir la subpresión bajo la misma aumentando la profundidad del agua en su zona de aguas abajo.
- La eliminación de bolsas de aire con flujo de canales abiertos y en canales circulares y aireación del agua en sistemas de suministros urbanos.
- La aireación de flujos y el desclorinado en el tratamiento de agua.

# 4 Equipo e instrumentación utilizada

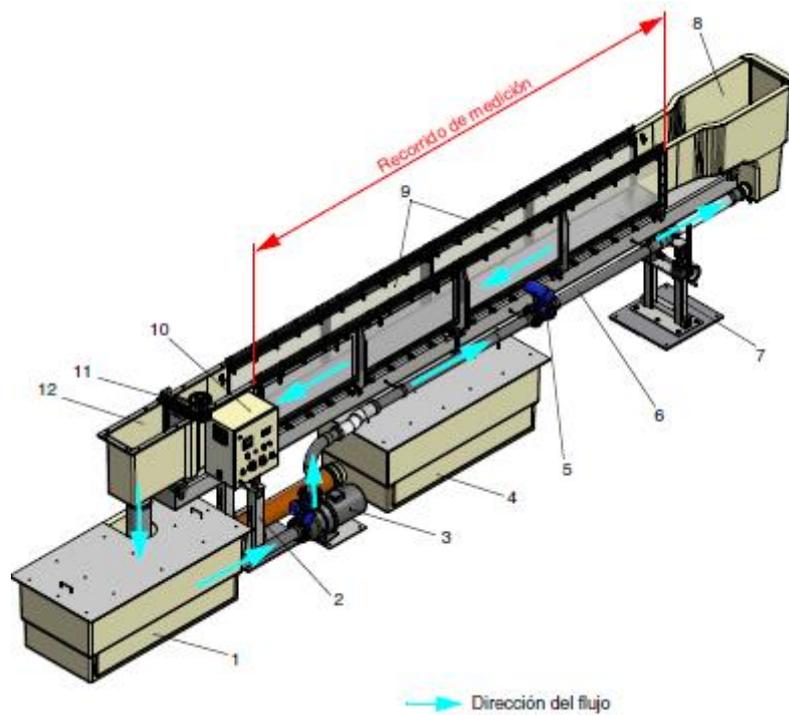
Este trabajo se ha realizado en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena.

## 4.1 Descripción del equipo de canal

Se ha utilizado un canal hidrodinámico rectangular, de sección transversal de 0.31 x 0.45 metros y 12.5 metros de longitud. Las paredes laterales del canal están constituidas por planchas vidrio de seguridad templado y el material de fondo es acero inoxidable.

El canal consta de un circuito cerrado de agua encargado de suministrar el caudal circulante. Dicho caudal se puede conocer a través del caudalímetro digital (m<sup>3</sup>/h) dispuesto en el mismo. La pendiente del canal puede inclinarse en sentido longitudinal sin escalonamiento, del -0.5% al +2.5%, gracias a un mecanismo elevador de husillo colocado en el cojinete con apoyo libre.

La Figura 4.1 muestra el canal empleado, indicando cada una de sus componentes. También muestra la dirección del flujo en cada punto del circuito cerrado.



1	Primer depósito de agua	7	Cojinete con apoyo libre con ajuste de la inclinación
2	Cojinete fijo	8	Elemento de entrada
3	Bomba de agua con chapaleta de cierre	9	Elemento central
4	Segundo depósito de agua	10	Armario de distribución
5	Caudalímetro electromagnético	11	Presa de alza
6	Tubería	12	Elemento de salida

Figura 4. 1. Esquema de componentes del canal. (Gunt, 2015)

En la Figura 4.2 y Figura 4.3, se muestran distintas imágenes del canal utilizado.



*Figura 4. 2. Canal empleado para la labor experimental.*



*Figura 4. 3. Vista desde aguas arriba del canal hidrodinámico.*

A continuación, se describen algunos elementos del canal:

- *Soportes reguladores de altura:* destinados a recibir el peso del canal, permiten modificar la pendiente del mismo. En la Figura 4.4 se muestra el sistema encargado de modificar la pendiente del canal.



Figura 4. 4. Mecanismo de variación de la pendiente longitudinal.

- *Depósito de almacenamiento (Figura 4.5):* Recoge el agua recirculada por el canal. La capacidad de este depósito de almacenamiento es de 1.100 L.



Figura 4. 5. Depósito de agua con tapa. (Gunt, 2015)

- *Depósito terminal con compuerta niveladora de calado:* Al final del canal se dispone una compuerta en su interior que permite la regulación del calado aguas abajo. Esta compuerta permite situar el resalto hidráulico al pie de la compuerta plana vertical.
- *Bomba de alimentación (Figura 4.6):* La unidad de bombeo consta de una placa base para fijarla al suelo y de una bomba con motor trifásico. El caudal proporcionado es regulado automáticamente por un variador de frecuencia que modifica el número de revoluciones de la bomba de agua.

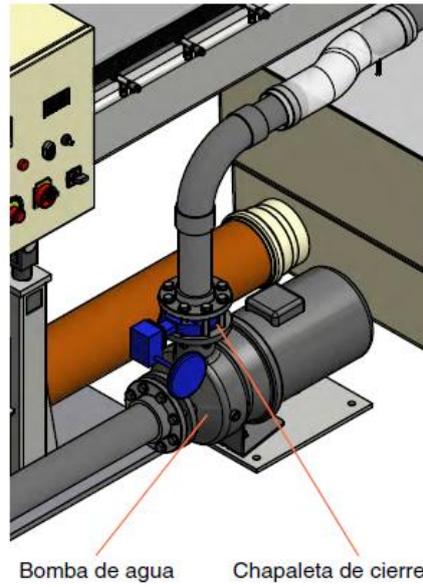


Figura 4. 6. Esquema de la bomba de agua. (Gunt, 2015)

- **Caudalímetro digital:** La tubería entre la bomba de agua y el elemento de entrada posee un caudalímetro electromagnético. El caudal medido se indica en el panel de control (Figura 4.7).

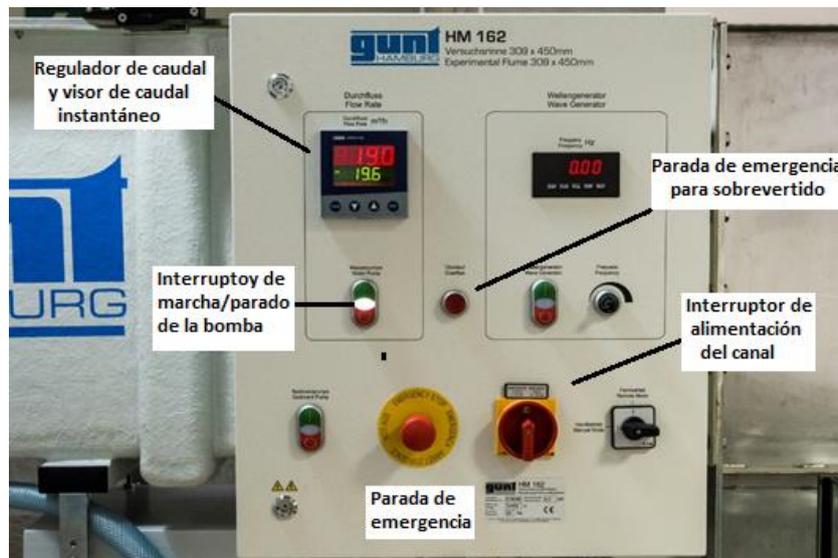


Figura 4. 7. Panel de control.

## 4.2 Velocímetro Acústico Doppler

El Velocímetro Acústico *Doppler* (*Acoustic Doppler Velocimeter, ADV*) es un instrumento versátil, de alta precisión, utilizado para medir las componentes de la velocidad del agua en una gran variedad de condiciones de flujo. El instrumento ADV utiliza la tecnología *Doppler* para registrar velocidades de flujos en un pequeño volumen de medición, localizado a una distancia de 5 cm del instrumento.

La sonda ADV usa un emisor y dos, tres o cuatro receptores acústicos, sonda 2D o 3D, respectivamente. En la Figura 4.8 se muestra un ejemplo de sonda 3D.

Por otro lado, cabe destacar que las técnicas de acondicionamiento de la señal implementadas en el ADV presentan importantes ventajas como:

- Mediciones de las componentes del vector velocidad en un volumen de medición alejado, reduciendo la intrusividad o perturbación del equipo en la zona de medida.
- Calibración de fábrica invariante (no requiere recalibración periódica en campo o laboratorio).
- Operación simple.
- Funcionamiento excelente para condiciones de flujo lento.



Figura 4. 8. Ejemplo sonda 3D. (Márquez, 2005)

La sonda empleada en este trabajo es de tipo 3D, de 16 MHz y fabricada por Nortek (2005).

### 4.2.1 Componentes del instrumento

- **Sonda:** La sonda del velocímetro acústico está formada por un emisor de la señal acústica, que se encuentra situado en el eje de la misma, y tres receptores para recibir la señal reflejada, cuyas extremidades vistas en planta están desplazadas  $120^\circ$  entre sí, y forman un círculo de 7.7 cm de diámetro.

La Figura 4.9 y 4.10 muestran de forma esquemática los distintos elementos que componen la sonda y su sensor acústico.



Figura 4. 9. a. Partes de la sonda 3D.

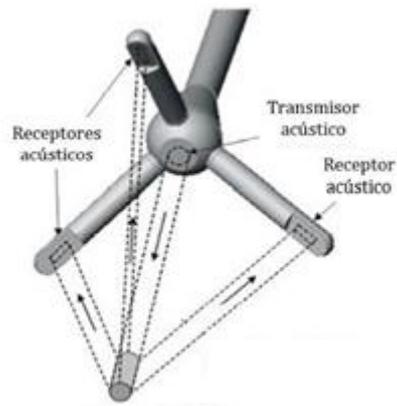


Figura 4. 10. Partes de la sonda 3D.

**Volumen de medición:** La localización del volumen de medición queda determinada por la geometría de la sonda. Normalmente esta distancia está aproximadamente a 5 cm desde el extremo de la misma, dependiendo del modelo de ADV seleccionado. La sonda empleada para la realización de las medidas utilizadas en este proyecto obtiene los datos a una distancia de 5 cm.

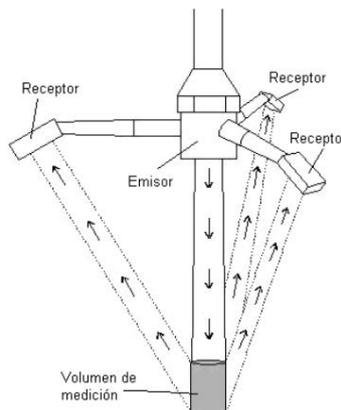


Figura 4. 11. Volumen de control de una sonda ADV.

El tamaño del volumen de muestreo de ADV es determinado por la configuración usada. El volumen de muestreo estándar es un cilindro de agua con un diámetro de 4.5 mm y una altura de 5.6 mm.

- **Módulo de procesamiento de la señal** (Figura 4.12): Es utilizado el procesamiento de pulso-coherente ya que proporciona la mejor resolución posible espacial y temporal (Carrillo, 2004)



Figura 4. 12. Módulo de procesamiento de la señal del equipo ADV.

#### 4.2.2 Funcionamiento de la sonda

El emisor genera una onda acústica, de frecuencia  $f_e$  y velocidad del sonido  $c$ , cuya longitud de onda es  $\lambda_e = c/f_e$ . Esta onda acústica es propagada a través del fluido (medio de transmisión de la señal).

La onda se mueve a la velocidad del sonido y rebota en las partículas en suspensión que son arrastradas por el agua. La velocidad de estas se considera igual a la velocidad del fluido debido a que solo experimentan un retardo inercial despreciable respecto a la velocidad real del fluido. Por su parte, los receptores rodean al emisor midiendo cada uno una proyección del vector velocidad, gracias al eco detectado.

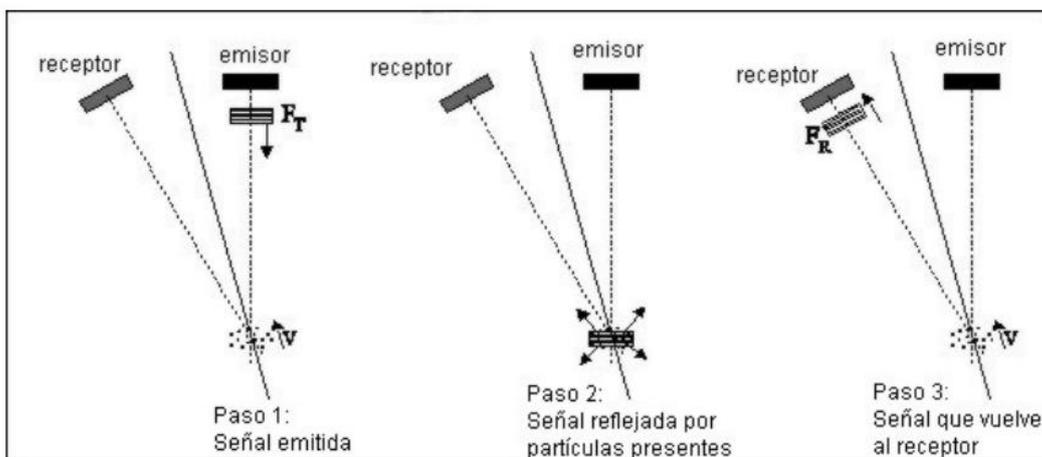


Figura 4. 13. Esquema del principio de funcionamiento del velocímetro ADV. (Márquez,2005)

La onda acústica rebotada, que difiere de la onda emitida, tiene una frecuencia de  $f_r = c/\lambda_r$ , con una velocidad de onda  $u$  y una longitud de onda  $\lambda_r$ .

Se llama frecuencia *Doppler*, al cambio de frecuencia de la onda acústica generada por el emisor e inducida por el movimiento de las pequeñas partículas, siendo  $f_D = f_r - f_e$ . Si relacionamos esta frecuencia *Doppler* con las proyecciones de la velocidad  $u$  de las pequeñas partículas en la dirección de los ejes del emisor y el receptor,  $u_e$  y  $u_r$ , la frecuencia *Doppler* resulta ser  $f_D = f_c/c(u_e + u_r)$ .

Según Molina (2010), en flujos altamente turbulentos y aireados, solo se pueden determinar sus índices con alta resolución cuando las señales son coherentes pulso a pulso. Sin embargo, en estos casos, la señal suele captar ruidos y señales parásitas. Blackaert y Lemin (2006) apuntan las siguientes características de la señal:

- El contenido de energía está uniformemente distribuido en el dominio de la frecuencia investigada, lo que hace difícil su localización o detección (ruido blanco).
- Es insesgado, no afecta a la estimación de velocidades medias temporales.
- Es estadísticamente independiente de la frecuencia *Doppler* verdadera correspondiente.
- Aunque el ruido es estadísticamente independiente, las tensiones normales turbulentas sí están afectadas por el ruido.
- En flujos aireados se debe realizar el filtrado de las señales obtenidas.

## 4.3 Filtrado de datos

Uno de los principales objetivos de este Trabajo Fin de Máster consiste en el filtrado de las velocidades medidas con un equipo *Doppler* (ADV).

### 4.3.1 Problemática de la sonda (Acoustic Doppler Velocimeter, ADV) y necesidad de filtrado de datos

La medición de velocidades instantáneas mediante instrumentación *Doppler*, es una herramienta de gran utilidad en hidráulica a la hora de caracterizar un flujo, bien sea en laboratorio o en campo (ríos, canales, etc.).

En el caso de flujos unifásicos, sin presencia de aire, los resultados son muy fiables pues el agua constituye el elemento fundamental de transmisión de la señal.

Sin embargo, para flujos bifásicos (aire-agua), las señales pueden verse afectadas, en mayor o menor grado, por la presencia de burbujas de aire que se interponen en la recepción de datos y que provocan la aparición de datos erróneos o *Spikes*.

La alteración de las señales de muestreo se debe principalmente a tres causas (Molina, 2010):

- *Ruido blanco*: señales parásitas muy complicadas de detectar y eliminar. Hunther y Lemin (2006) propusieron emplear un ADV de cuatro receptores que, gracias a la información redundante que se obtiene en una de las componentes, permitiese identificar y eliminar los datos erróneos mediante un filtrado.



Figura 4. 14. Sonda ADV con cuatro receptores.

- *Flujos con alta intensidad de turbulencia y aireados*: La presencia de burbujas de aire que atraviesan el volumen de muestreo se interponen a las ondas sónicas emitidas por el equipo, produciendo así un error en la adquisición de la velocidad real (*spike*). En estas situaciones se observa la presencia de *Spikes* puntuales aleatorios claramente realzados (Figura 4.15).

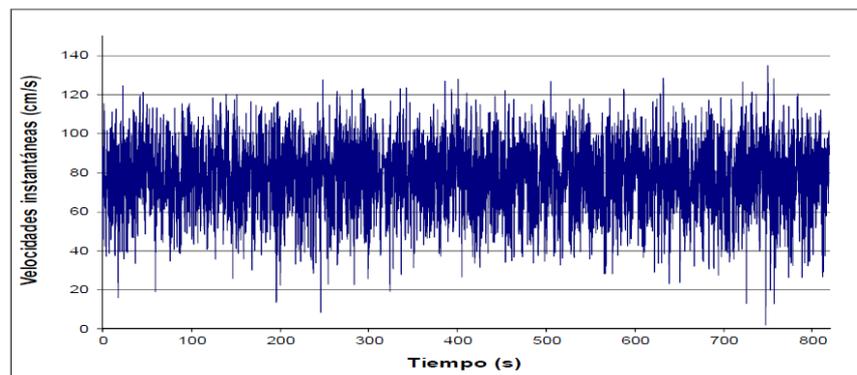


Figura 4. 15. Registro base obtenido en un resalto hidráulico. Afectado principalmente por la alta turbulencia y la presencia de aire. (Molina, 2010)

- Solapamiento de la señal por ambigüedades de diferencia de fase: Ocurre cuando el pulso entrante y saliente se realiza fuera del rango comprendido entre  $180^\circ$  y  $-180^\circ$ . Así, se produce la ambigüedad causando un *spike* en el registro. En nuestra experimentación, suele suceder cuando la velocidad del flujo muestreada excede el rango de velocidad predeterminado en la calibración del aparato de medida.

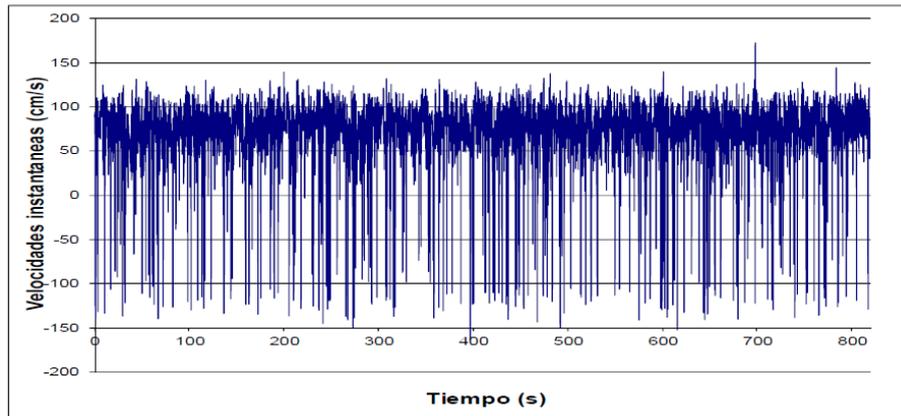


Figura 4. 16. Registro base obtenido en un resalto hidráulico. Afectado principalmente por el fenómeno de ambigüedad de diferencia de fase. (Molina,2010)

Aunque los *Spikes* pueden ser reducidos y/o eliminados mediante el ajuste de los parámetros del equipo de medida, existen situaciones en la que no pueden ser totalmente eliminados.

El resalto hidráulico puede ser considerado como una de estas situaciones problemáticas debido a: la alta intensidad de turbulencia con entrada de aire, la fuerte disipación de energía y mezcla, el levantamiento brusco de la superficie libre y la generación de ondas y espray.

De este modo, el filtrado de datos nos permite detectar y eliminar los *spikes* que se producen en las mediciones de velocidades instantáneas realizadas con equipo *Doppler*.

#### 4.3.2 Pasos de un filtrado de datos

Los procedimientos en el tratamiento de los registros constan básicamente de dos pasos.

##### 4.3.2.1 **Detección**

El primer paso se basa en la elección de criterios de detección de spikes y, para ello, se emplean parámetros físicos y/o estadísticos, correctamente justificados, llamados umbrales.

La detección debe ser selectiva y crítica, pues no debe alterar significativamente la serie original.

##### 4.3.2.2 **Reemplazo**

El reemplazo es de vital importancia si se pretende conservar la serie de datos completa para su posterior tratamiento. Si solo se requieren los valores medios, la sustitución de spikes será irrelevante. En este proyecto se quiere conservar el número de datos muestreado, siendo necesario el reemplazo y una buena elección del mismo.

Siguiendo a Molina (2010), se opta por un reemplazo por la media de los doce puntos más cercanos. Este método da los valores más próximos a la serie original y a la serie sin reemplazo (serie reducida).

A continuación, se detalla el proceso y elaboración del método del filtrado utilizado.

### 4.3.3 Método del umbral espacio-estado, PSTM (Goring y Nikora, 2002)

Este método se basa en el mapa de representación de Poincaré o representación Espacio-Estado, donde graficamos la variable velocidad y sus derivadas primera y segunda.

Para cada plano, se traza una elipse cuyos ejes son determinados por el criterio Universal y se detectan aquellos puntos de datos que se ubican fuera de ella, los cuales son conocidos como *spikes*. El proceso se detiene cuando no se muestran más datos fuera de la misma, es decir, se itera tantas veces como sea necesario hasta conseguir que todos los puntos se encuentren dentro de la elipse.

Pasos de cálculo:

- 1 Cálculo de la primera y segunda derivada con el algoritmo de diferencia central:

$$\Delta u_i = (u_{i+1} - u_{i-1})/2 \quad (4.1)$$

$$\Delta^2 u_i = (\Delta u_{i+1} - \Delta u_{i-1})/2 \quad (4.2)$$

Se puede ver que las expresiones no están divididas entre intervalos de muestreo  $\Delta t$ , con el objeto de que las ecuaciones no estén mal condicionadas.

- 2 Cálculo de las desviaciones estándar de las variables  $\sigma_u$ ,  $\sigma_{\Delta u}$  y  $\sigma_{\Delta^2 u}$ , y de ahí los valores máximos esperados.
- 3 Cálculo del ángulo de rotación del eje mayor de la elipse  $\Delta^2 u_i = f(u_i)$ , utilizando la expresión cross-correlación:

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \left( \sum u_i \Delta^2 u_i \right) / \left( \sum u_i^2 \right) \right] \quad (4.3)$$

- 4 Para cada par de variables se calcula la elipse, con sus respectivos ejes mayor y menor:

Para el plano  $\Delta u_i = f(u_i)$ , el eje mayor es  $\lambda_u \sigma_u$  y el eje menor  $\lambda_u \sigma_{\Delta u}$ .

Para el plano  $\Delta^2 u_i = f(u_i)$ , el eje mayor es  $\lambda_u \sigma_{\Delta u}$  y el eje menor  $\lambda_u \sigma_{\Delta^2 u}$ .

Los ejes de los planos  $\Delta^2 u_i = f(u_i)$  son a y b, ejes mayores y menores, respectivamente.

Las ecuaciones de cálculo de a y b, son:

$$(\lambda_u \sigma_u)^2 = a^2 \cos^2(\theta) + b^2 \sin^2(\theta) \quad (4.4)$$

$$(\lambda_u \sigma_{\Delta^2 u})^2 = b^2 \cos^2(\theta) + a^2 \sin^2(\theta) \quad (4.5)$$

- 5 Identificar puntos anómalos para cada proyección de los planos espacio-estado y sustituirlos.

Para posicionar la elipse se hace uso de la media y para el tamaño de la misma se recurre a la desviación típica.

Los puntos que quedan fuera de las elipses son eliminados. Se consideran puntos anómalos o erróneos (spikes).

En cada iteración se reemplazan los spikes, reduciéndose los valores de desviación estándar y disminuyendo asimismo el tamaño de las elipses.

*Goring y Nikora (2002)* recomiendan que el mejor reemplazo de spikes es la adaptación de un polinomio de tercer grado. Para ello se utilizan los doce puntos más cercanos al dato, eliminado e interpolando a través del spike.

#### 4.3.4 Método del umbral espacio-estado, PSMT+C (Castillo, 2009)

Este método, al igual que el PSMT, se basa en el mapa de representación de Poincaré o representación Espacio-Estado donde se grafica la variable velocidad y sus derivadas primera y segunda.

Sin embargo, la diferencia respecto al método explicado anteriormente consiste en una variación en el método de cálculo de la elipse y en su inclinación en el plano donde se grafica la segunda derivada de la velocidad con respecto a la velocidad, plano  $\Delta^2 u_i = f(u_i)$ .

Para el cálculo del ángulo de rotación se propone la siguiente ecuación, obtenida por el ajuste de Gauss:

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \left( n \sum u_i \Delta^2 u_i - \sum u_i \sum \Delta^2 u_i \right) / \left( n \sum u_i^2 - \left( \sum u_i \right)^2 \right) \right] \quad (4.6)$$

Para el cálculo de los ejes de la elipse, se dedujeron las siguientes ecuaciones:

$$(\lambda_u \sigma_u)^2 = a^2 \cos^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) + b^2 \left( \frac{\lambda_u \sigma_u}{\lambda_u \sigma_{\Delta^2 u}} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (4.7)$$

$$(\lambda_u \sigma_{\Delta^2 u})^2 = b^2 \cos^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) + a^2 \left( \frac{\lambda_u \sigma_{\Delta^2 u}}{\lambda_u \sigma_u} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (4.8)$$

Este sistema de ecuaciones cumple, en cualquier situación, la identidad trigonométrica prescrita.

En la Figura 4.17 se ve cómo la inclinación de la elipse propuesta por Castillo (2009) se ajusta mejor a la pendiente natural de la muestra que la propuesta por Goring y Nikora (2002). El tamaño y forma de la elipse no sufre gran variación.

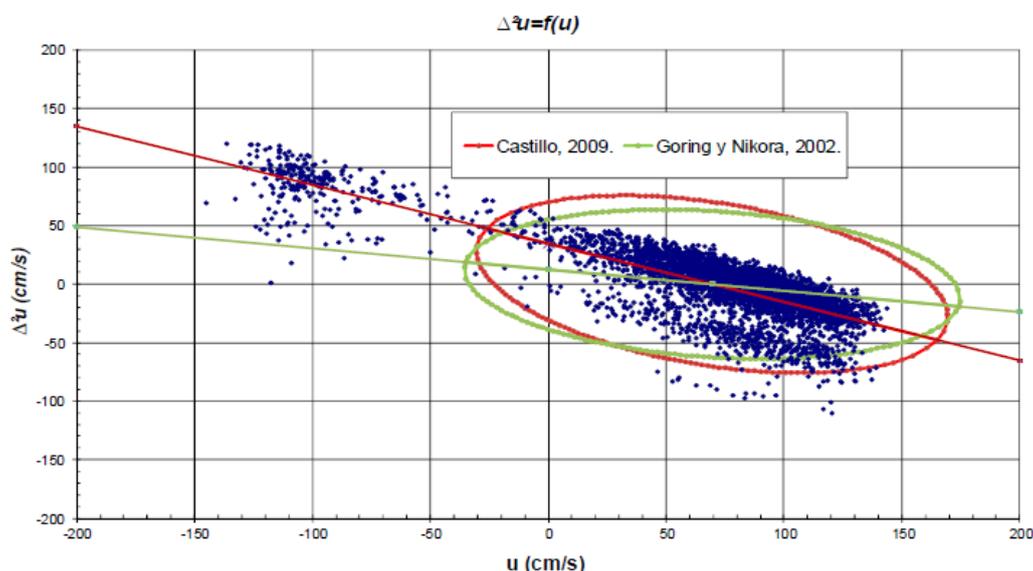


Figura 4. 17. Comparación Goring y Nikora (2002) y Castillo (2009).

Este último método ha sido el filtrado empleado en la elaboración de este proyecto. A continuación, en la Tabla 4.1 se muestra un registro original, caudal de 50 m<sup>3</sup>/h y número de Froude de 4.55, y el resultado obtenido tras someter dicha muestra a uno, dos y tres pasos de filtrado.

	Serie original	1º Filtrado	2º Filtrado	3º Filtrado
<b>Velocidad media</b>	42,447	<b>39,731</b>	36,040	31,908
<b>Desviación Estándar</b>	39,80	<b>28,23</b>	20,81	15,47
<b>Número de Spikes</b>		<b>700</b>	1511	2319

Tabla 4. 1. Modelo de tratamiento de datos

En esta ocasión, el número de filtrados necesario ha sido uno (dato en negrita), es decir, con un filtrado se han conseguido eliminar todos los valores anómalos y homogeneizar la muestra.

El registro sin filtrar se muestra en la Figura 4.18. En las siguientes figuras, se representa la muestra después de un primer, segundo y tercer filtrado (Figura 4.19, 4.20 y 4.21, respectivamente).

Se puede observar que con un segundo filtrado, los datos anómalos de la muestra se eliminan, con lo que filtrados posteriores podrían resultar excesivos y alterar la serie inicial.

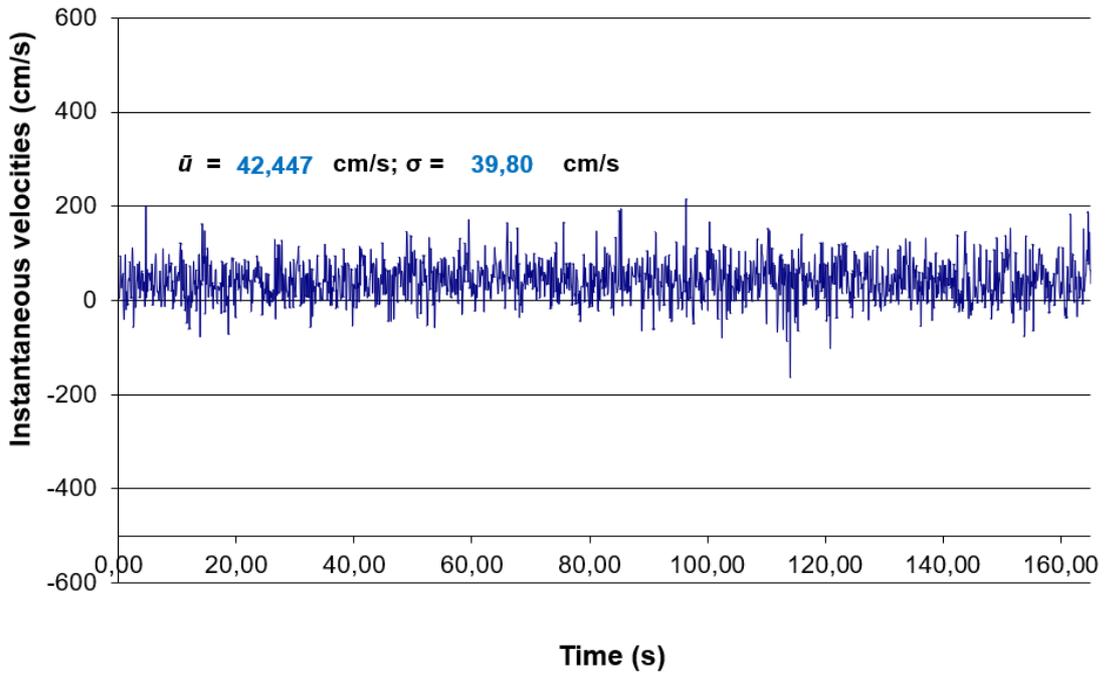


Figura 4. 18 Registro de velocidades correspondientes al registro original.

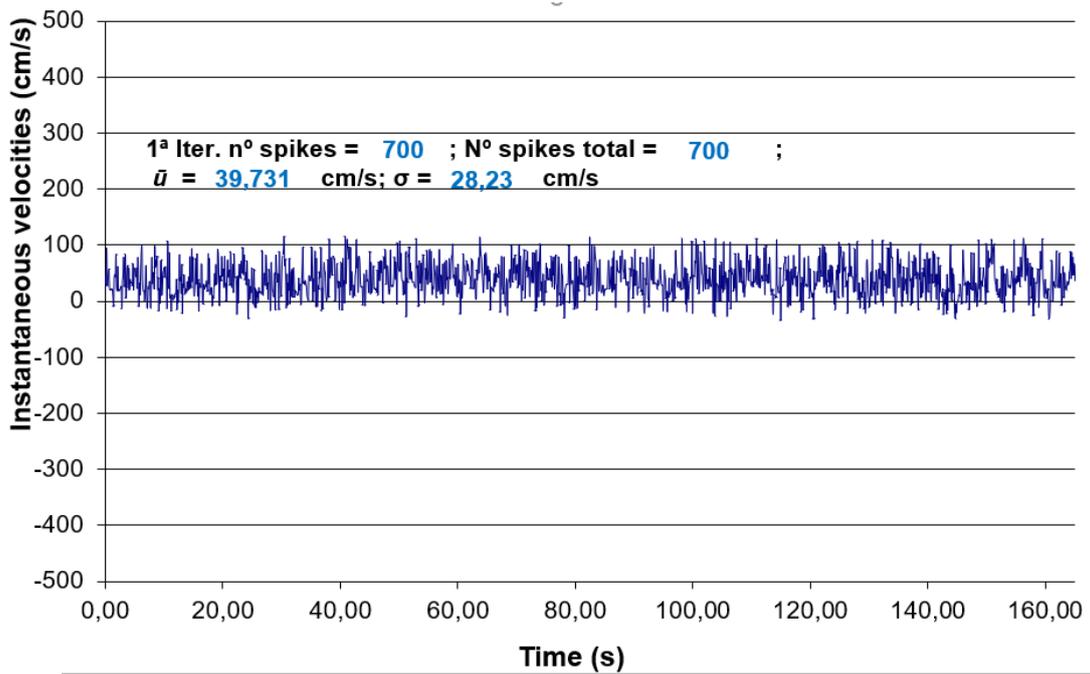


Figura 4. 19. Registro de velocidades correspondientes al registro tras el primer filtrado.

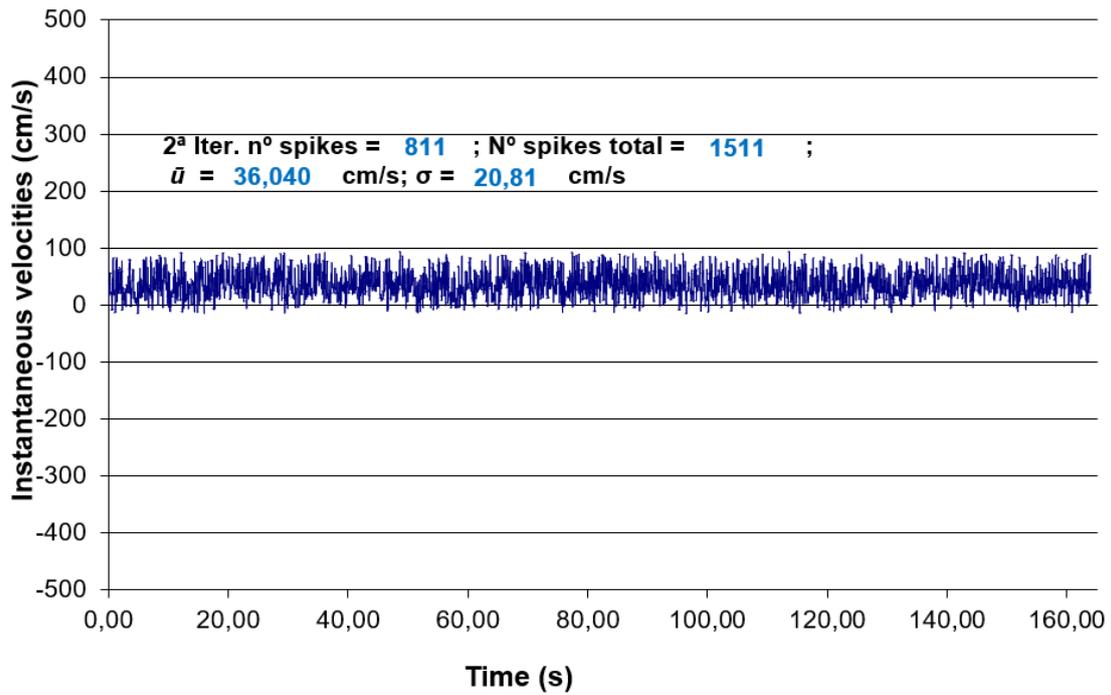


Figura 4. 20. Registro de velocidades correspondientes al registro tras el segundo filtrado.

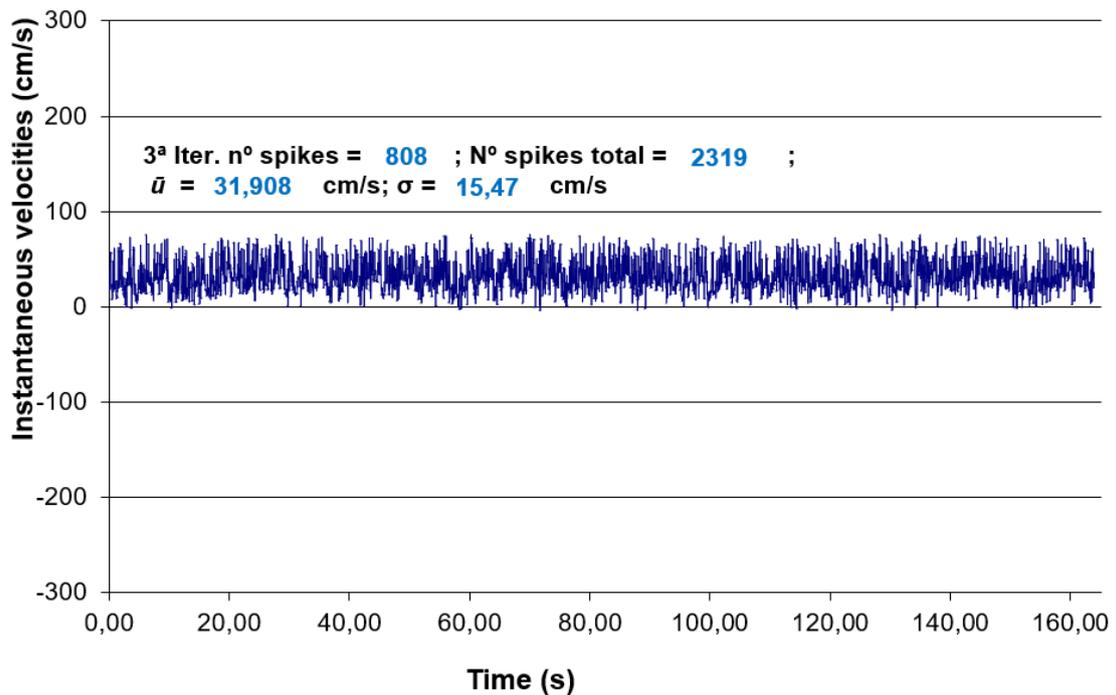


Figura 4. 21. Registro de velocidades correspondientes al registro tras el tercer filtrado.

El número de filtrados aplicados a cada muestra ha dependido de los requerimientos de la misma. Sin embargo, ninguna muestra se ha filtrado más de dos veces para no alterar la serie inicial y distorsionar excesivamente la señal.

## 4.4 Equipo informático y recopilación de datos

Para la posible realización de este proyecto, el ordenador ha sido un elemento fundamental e imprescindible. Los softwares usados para el procesamiento de la información emitida por la sonda han sido CollectV y ExploreV (Figura 4.22)



*Figura 4. 22. Equipo informático utilizado durante un ensayo con el software CollectV.*

# 5 Campaña experimental

## 5.1 Posición de medida en los resaltos hidráulicos

El resalto ha sido dividido en ocho secciones transversales (Figura 5.1) en las que se han medidos los valores de las velocidades instantáneas, obteniendo los perfiles de velocidad en las mismas.

La primera sección ( $S_0$ ) se toma al inicio del resalto a pie de compuerta; la segunda sección ( $S_1$ ) se posiciona a  $1/8$  de la longitud del resalto; la tercera sección ( $S_2$ ) se encuentra a  $2/8$  de la longitud del resalto; la cuarta sección ( $S_3$ ) está a  $3/8$  de la longitud del resalto; la quinta sección ( $S_4$ ) se sitúa en la mitad del resalto. De la misma forma, sumando  $1/8$  de la longitud del resalto a la posición de la sección anterior, obtenemos la posición de la siguiente. Así, la última sección ( $S_8$ ) se encuentra al final del resalto.



Figura 5. 1. Esquematación de las secciones analizadas en resaltos hidráulicos libres.

## 5.2 Características de los resaltos analizados

Previamente a discutir los resaltos obtenidos en cada uno de los resaltos hidráulicos estudiados aguas abajo de una compuerta plana vertical, se procederá a la especificación de algunos de sus parámetros.

En la Tabla 5. 1 se recogen los parámetros del resalto hidráulico que han podido ser medidos en laboratorio (Figura 5.2).

Nº de Froude	Q (m <sup>3</sup> /h)	Q (m <sup>3</sup> /s)	y <sub>1 medida</sub> (m)	Y <sub>2 medido</sub> (m)	L <sub>medida</sub> (m)
7,56	39,0	0,0108	0,0130	0,126	0,87
6,19	47,8	0,0132	0,017	0,133	0,93
4,55	50,0	0,0138	0,0215	0,130	0,84
5,19	55,0	0,0152	0,0210	0,145	0,92
4,36	60,0	0,0166	0,0250	0,150	0,94
5,73	67,4	0,0187	0,0225	0,170	1,20

Tabla 5. 1. Principales características de los resaltos hidráulicos medidas en laboratorio.

donde:

- $Q$ , caudal circulante.
- $y_a$ , abertura de compuerta.
- $L_j$ , longitud del resalto.
- $y_0$ , nivel de la lámina aguas arriba de la compuerta.
- $y_1$ , calado aguas arriba del resalto.
- $y_2$ , calado aguas abajo del resalto.

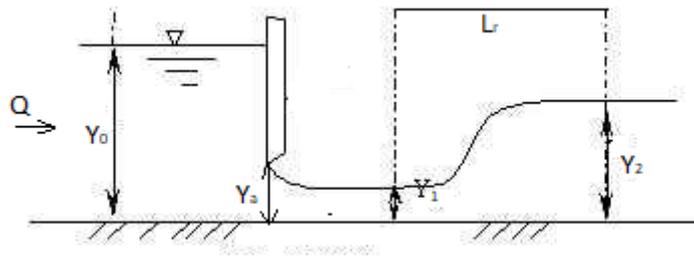


Figura 5. 2. Variables del resalto hidráulico. (Molina, 2010)

# 6 Introducción a la dinámica de fluidos computacional

---

Existen tres grandes metodologías en la dinámica de fluidos para determinar el comportamiento de un flujo tridimensional y obtener los valores de variables como la velocidad, presión, temperatura, etc. Estos tres métodos de análisis son los siguientes:

- Dinámica de fluidos teórica.
- Dinámica de fluidos experimental.
- Dinámica de fluidos computacional.

Se debe considerar que una combinación simultánea de los tres métodos es mejor camino para la resolución de un problema en ingeniería.

La metodología CFD (dinámica de fluidos computacional) obtiene resultados muy aproximados al comportamiento real de fluido mediante la discretización del dominio en elementos representativos o volúmenes de control.

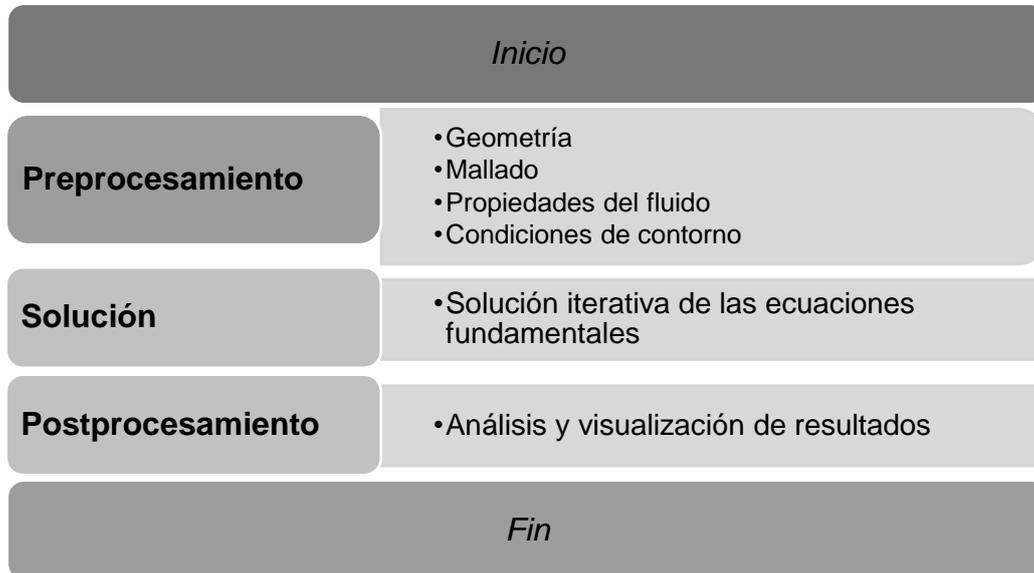
Para cada elemento se deben resolver numéricamente las ecuaciones generales que rigen el movimiento de un fluido en tres dimensiones. Esto se consigue aproximando las ecuaciones diferenciales complejas a un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas por métodos numéricos.

Cabe destacar que las ecuaciones Navier-Stokes, desarrolladas por Claude Navier (1785-1836) y George Stokes (1803-1819), son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas surgen de la modificación de las ecuaciones de Euler (1707-1783) para abarcar el caso más realista de un fluido viscoso. Las ecuaciones de conservación aplicadas a un volumen de control son:

- Principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad.
- Principio de conservación de la cantidad de movimiento o segunda ley de Newton.
- Principio de conservación de la energía.
- Ecuación de estado o comportamiento de un fluido
- Ecuaciones constitutivas del medio.

Hasta la fecha no existe una solución numérica que permita resolver las ecuaciones de conservación debido a la no linealidad a su complejidad matemática. Es por esto por lo que se debe recurrir al análisis numérico y a sus procesos iterativos para determinar soluciones aproximadas.

Toda metodología de dinámica de fluidos computacional tiene una secuencia de pasos muy similar. Estos algoritmos de cálculo permiten, de manera ordenada, introducir paso a paso los distintos componentes para una correcta simulación numérica. Los pasos son los siguientes:



Como se puede observar en el esquema anterior, existen tres pasos fundamentales a la hora de resolver un CFD, estos se desarrollarán en más detalle en los siguientes apartados.

## 6.1 Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional

La metodología CFD puede ser utilizada para resolver problemas de:

- Hidráulica – redes de tubería, depósitos, canales, presas...
- Aerodinámica – Aviones y automóviles.
- Hidrodinámica de embarcaciones.
- Motores.
- Turbomáquinas – bombas y turbinas.
- Transferencia de calor – sistemas de calentamiento o enfriamiento
- Combustión.
- Ingeniería de procesos – mezclas y reacciones químicas.
- Cargas de vientos – fuerzas y respuesta dinámica de estructuras.
- Riegos de fuego y explosiones.

- Ingeniería medioambiental – transporte de efluentes líquidos y gaseosos.
- Ingeniería costera – cargas en estructuras costeras y offshore.
- Oceanografía - corrientes oceánicas y maremotos.
- Meteorología – predicción numérica del tiempo.
- Ingeniería biomédica – flujo de sangre en el corazón, venas y arterias.
- Electrónica – refrigeración de circuitos.

## 6.2 Ventajas y restricciones de los modelos numéricos

Tanto los modelos físicos como los modelos numéricos tienen ventajas y desventajas sustanciales. En la Tabla 7.1 se recogen las ventajas y desventajas de estos.

	Modelo Físico	Modelo numérico
Ventajas	Visualización real del comportamiento del flujo en tres dimensiones	Reducción del tiempo y coste de investigación
	Obtención de coeficientes y parámetros experimentales para compararlos con los valores teóricos	Posibilidad de analizar situaciones difíciles de reproducir experimentalmente
Desventajas		Gran nivel de detalle
	Tamaño del modelo y capacidad de la bomba	Capacidad de archivos de datos
	Leyes de semejanza	Hipótesis de turbulencia

Tabla 6. 1. Diferencias entre modelo hidráulico y numérico.

## 6.3 Bases teóricas para la mecánica de fluidos computacional

Existen ciertas leyes físicas y ecuaciones que rigen el movimiento tridimensional de un fluido. Estas se conocen como las Ecuaciones Generales de la Mecánica de Fluidos y son ecuaciones conservativas que se aplican a un volumen de control  $V_c$ .

Las ecuaciones que rigen el movimiento se pueden expresar en forma diferencial y en forma integral. En la forma diferencial las ecuaciones conservativas se aplican a un elemento infinitesimal que cumple la hipótesis de Medio Continuo; en la forma integral, las ecuaciones conservativas se aplican a un volumen fluido fijo.

Las fuerzas que actúan sobre un fluido pueden ser externas o internas y son las siguientes:

- Fuerza de la gravedad (externa).
- Fuerza debida a la diferencia de presión (interna).
- Fuerza debida a la viscosidad (interna).
- Fuerza de la elasticidad (interna).

Deben ser consideradas las relaciones entre las magnitudes escalares, vectoriales y tensoriales, por eso los medios continuos deben satisfacer cuatro principios básicos:

- Conservación de la masa.
- Conservación de la cantidad de movimiento.
- Conservación de la energía (primer principio de la termodinámica).
- Segundo principio de la termodinámica.

### 6.3.1 Sistemas y volúmenes de control

Cuando se aplican los principios fundamentales, se puede optar por una de las dos opciones que se detallan a continuación:

- **Sistema:** Se define como una cantidad arbitraria de masa de identidad fija que se conserva. Todo lo externo al sistema constituye el entorno, y el sistema está separado de su entorno por su frontera o contorno. Las leyes de la mecánica determinan que ocurre cuando hay una interacción entre el sistema y el entorno.
- **Volumen de control:** Espacio delimitado por una superficie de control  $S_c$  cerrada, real o virtualmente. Un volumen de control cuenta con una forma y un tamaño fijo. La permanencia del espacio ocupado por el volumen de control hace que las partículas que la ocupan no sean siempre las mismas.

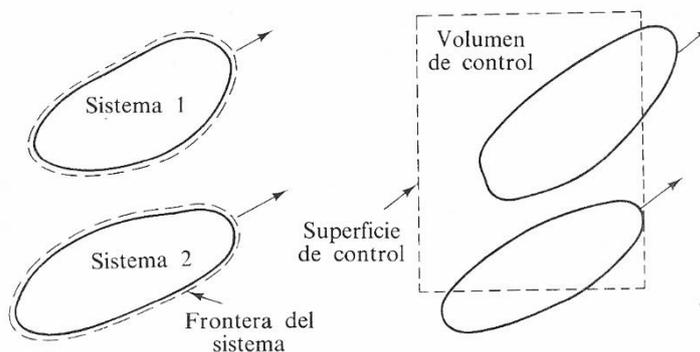


Figura 6. 1. Sistema y volumen de control

Para el caso de la mecánica de cuerpos rígidos, se utiliza el método del sistema, mientras que para el caso de la mecánica de fluidos se utiliza el método de los volúmenes de control.

## 6.4 Ecuación de conservación de la masa

El principio de conservación de masa establece que la masa total de un sistema cerrado (aquel que no intercambia masa con su entorno) que no contiene sumideros ni fuentes, permanece constante en el tiempo.

La forma diferencial de la ecuación de continuidad es la siguiente:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) \quad (6.2)$$

donde:

- $\rho$ , densidad del fluido.
- $u, v, w$ , componente de velocidad.
- $\vec{v}$ , vector velocidad.

Por su parte, la forma integral de la ecuación de conservación de masa en un volumen fijo es:

$$\iiint_{V_c} \frac{\partial(\rho)}{\partial t} dv + \iint_{S_c} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (6.3)$$

donde:

- $\vec{n}$ , vector normal.
- $A$ , área del volumen de control

## 6.5 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

El momentum o cantidad de movimiento o movimiento lineal de un sistema material es una magnitud vectorial que se obtiene multiplicando la masa total del sistema por la velocidad de su centro de masa. La importancia del momentum radica en que las variaciones de su valor están relacionadas con las fuerzas externas que actúan sobre el sistema. La conservación del momentum lineal de un sistema cerrado está cuantificada por la 2ª Ley de Newton.

Las fuerzas que actúan sobre un sistema fluido pueden ser de dos tipos: fuerzas de volumen y fuerzas de superficie.

La ecuación básica del momentum para un elemento diferencial es:

$$\rho \vec{g} - \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}_{ij} = \rho \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (6.4)$$

donde:

- $g$ , gravedad
- $\vec{\tau}_{ij}$ , esfuerzo cortante viscoso

La ecuación del momentum es tan breve y compacta que su inherente complejidad es casi invisible. A continuación, escribimos las ecuaciones en forma desarrollada para ilustrar las dificultades matemáticas que existen:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w \right) \quad (6.5)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v + \frac{\partial v}{\partial z} w \right) \quad (6.6)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial y} v + \frac{\partial w}{\partial z} w \right) \quad (6.7)$$

### 6.5.1 Ecuación de Euler

Euler (1707-1783) planteó las ecuaciones generales para un fluido perfecto en movimiento. Para el desarrollo de dichas ecuaciones, no consideró la viscosidad ( $\tau_{ij} = 0$ ), y las presiones se ejercían sobre un paralelepípedo en dirección normal a las caras de este.

Dicho paralelepípedo tenía lados infinitesimales y un volumen que se determinaba como el producto de sus lados. A este volumen se aplicaba la Segunda Ley de Newton.

De este modo, las ecuaciones de Euler para las tres direcciones solo consideran velocidades y presiones.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \rho g_x - \left( \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (6.8)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \rho g_y - \left( \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v + \frac{\partial v}{\partial z} w + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (6.9)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \rho g_z - \left( \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial y} v + \frac{\partial w}{\partial z} w + \frac{\partial w}{\partial t} \right) \quad (6.10)$$

### 6.5.2 Ecuaciones de Navier-Stokes

Para un fluido newtoniano las tensiones viscosas son proporcionales a las relaciones de deformación del elemento y al coeficiente de viscosidad. En el caso de un flujo incompresible viscoso tridimensional tenemos que:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6.11)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6.12)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6.13)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (6.14)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (6.15)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (6.16)$$

donde  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad dinámica.

Sustituyendo estas últimas ecuaciones en la ecuación del momentum diferencial, se obtienen las conocidas ecuaciones de Navier- Stokes.

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (6.17)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (6.18)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right) \quad (6.19)$$

### 6.5.3 Tensiones de Reynolds

Las leyes de viscosidad de Stokes y las ecuaciones de Navier-Stokes son aplicables a un flujo turbulento si se usan las velocidades y magnitudes reales. Pero desde un punto de vista físico e ingenieril, resulta más práctico obtener expresiones a partir de valores temporales medios, ya que estas son magnitudes que pueden ser medidas por un observador con instrumentos convencionales.

A continuación, se derivan las ecuaciones aplicables a movimientos turbulentos con valores temporales medios de magnitudes.

Para esto, se van a sustituir todas las variables que aparecen en las ecuaciones de Navier- Stokes por la suma de las medias temporales y de las componentes debidas a las fluctuaciones.

$$u = \bar{u} + u' \text{ (Esta expresión se sustituye en el término } u \frac{\partial u}{\partial x} \text{)}$$

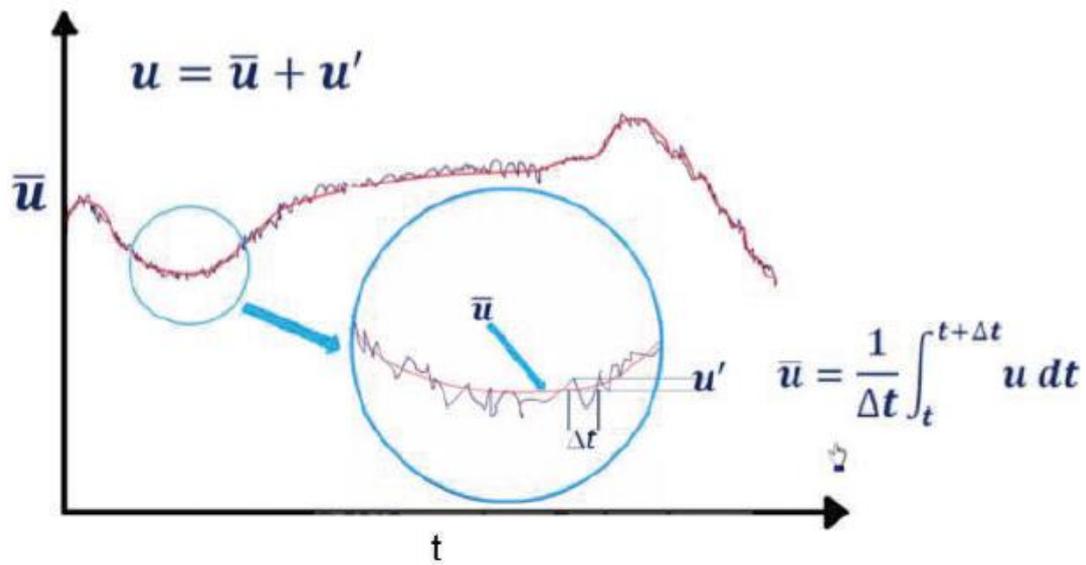


Figura 6. 2. Esquema de valores medios y fluctuaciones, tensiones de Reynolds. (Ortega, 2015)

#### 6.5.4 Teorema del transporte de Reynolds

En general, el teorema del transporte de Reynolds relaciona el ritmo de variación en un dominio móvil (el de la masa de control) y un dominio fijo (el del volumen de control) o incluso entre varios volúmenes móviles.

Así, este teorema, considera una región de flujo donde se ha delimitado un volumen de control y se ha seleccionado un sistema, de manera que en el instante inicial las partículas del sistema están todas dentro del volumen de control.

Con el paso del tiempo, algunas partículas del sistema viajan a través de la superficie de control abandonándola, otras partículas cruzarán la superficie de control desde el exterior y, al mismo tiempo, otras permanecerán dentro del volumen de control al cabo del intervalo de observación.

La variación temporal de la variable  $\phi$  en dicho volumen de control, a partir del principio de conservación, se describe como:

$$\frac{d}{dt} \phi_{Sist} = \frac{d}{dt} \left( \int_{VC} \phi \rho dV \right) + \int_{SC} \phi \rho (V \cdot \eta) dA \quad (6.20)$$

Podemos concluir que existen dos mecanismos para la generación de flujo. Estos son: la convección, asociada al movimiento del fluido (nivel macroscópico) y la difusión, originada a nivel molecular (nivel microscópico).

Por su parte, la forma vectorial de la ecuación general de transporte es la siguiente:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{Temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho v \phi)}_{\text{Convectivo}} = \underbrace{\nabla(\Gamma \nabla \phi)}_{\text{Difusivo}} + \underbrace{S}_{\text{Fuente}} \quad (6.21)$$

- **Término temporal:** Representa, dentro del volumen de control, la variación local con el tiempo de la variable específica  $\phi$ .
- **Término convectivo:** Representa el movimiento o transporte de la variable  $\phi$  de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo.
- **Término difusivo:** Representa el fenómeno de transferencia que ocurre a nivel molecular.
- **Término fuente:** Toma en consideración cualquier tipo de fuente sumidero de la variable transportada.

## 6.6 Introducción a los modelos de turbulencia, usos y aplicación

La turbulencia es el movimiento inestable y caótico que ocurre en los fluidos cuando las fuerzas viscosas no son suficientes para estabilizar el flujo. La turbulencia se representa como fluctuaciones en el espacio y tiempo dentro de un campo fluido.

Ante la dificultad de una definición precisa de la turbulencia, se opta por la enumeración de las propiedades más destacables de los movimientos turbulentos:

- **Vorticidad:** Magnitud física empleada en la mecánica de fluidos para cuantificar la rotación de un fluido.
- **Difusividad:** Los fenómenos de transporte de masa, cantidad de movimiento y disipación energía se ven notablemente amplificados por efecto de la turbulencia. Esto se debe a las fluctuaciones del movimiento turbulento. Si bien estas fluctuaciones tienen lugar a escalas mucho mayores que la escala molecular, producen, efectos difusivos semejantes a los de carácter molecular (al menos cualitativamente).
- **Aleatoriedad:** Es la característica más fácilmente apreciable para cualquier observador. La irregularidad se manifiesta en la aparición de fluctuaciones de las variables fluidodinámicas (velocidad, presión, temperatura, concentración) con tamaños y tiempos muy dispares (diferentes escalas). Se producen fluctuaciones no estacionarias en flujos inicialmente estacionarios. A pesar de ser un

fenómeno determinista, los flujos turbulentos parecen caóticos e impredecibles, lo que justifica el uso de métodos estadísticos para su estudio.

- *Tridimensionalidad:* Pueden existir flujos turbulentos que, al ser promediados en el tiempo, resulten ser bidimensionales. También pueden existir movimientos turbulentos en los que las escalas más grandes de la turbulencia sean fundamentalmente bidimensionales. Sin embargo, a medida que se desciende en el tamaño de las escalas dentro del amplio espectro que caracteriza a la turbulencia, se encuentra que el movimiento asociado a estas escalas pequeñas es siempre tridimensional.
- *Disipación:* Los flujos turbulentos son siempre disipativos. Una vez que se ha desarrollado el flujo turbulento, la turbulencia tiende a mantenerse, aunque para ello necesite de un aporte continuo de energía. Esta energía se extrae del flujo principal y la invierte en aumentar la energía interna mediante procesos de deformación a los que se ven sometidas las partículas fluidas. La turbulencia necesita de una transferencia continua de energía para reponer esas pérdidas viscosas. Si no existe suministro de energía, la turbulencia decae rápidamente.
- *Altos números de Reynolds:* La turbulencia se origina frecuentemente como una inestabilidad de flujos laminares. Del análisis de la estabilidad de soluciones de flujos laminares se evidencia que la solución se hace inestable a partir de un cierto valor del número de Reynolds, o valor crítico. Sin embargo, el valor efectivo de dicho número depende del tipo de aplicación.

El parámetro empleado para medir la turbulencia es el número de Reynolds.

$$R_e = \frac{V * L}{\nu} \quad (6. 22)$$

donde:

- $V$ , velocidad.
- $L$ , longitud característica.
- $\nu$ , coeficiente de viscosidad dinámica.

Para altos valores de número de Reynolds, se puede decir que el flujo es turbulento, produciéndose una disminución de la estabilidad natural del fluido y la aparición de remolinos de distintos tamaños. El flujo turbulento, es un flujo real por lo que los modelos no pueden despreciar la turbulencia y considerar únicamente un flujo laminar. La caracterización de la turbulencia se encuentra bajo teorías estadísticas y de campos aleatorios.

En definitiva, la turbulencia es un fenómeno complejo, gobernado por las ecuaciones de la Mecánica de Fluidos para un medio continuo: incluso las escalas más pequeñas que aparecen en un flujo turbulento están muy lejos de las escalas de longitud molecular, por lo que su solución analítica resulta inviable. La dinámica de la turbulencia es la misma en todos los fluidos, sean líquidos o gases, si el número de Reynolds es

suficientemente grande. Debido a que las ecuaciones del movimiento son no lineales, cada tipo de flujo posee ciertas características singulares que van asociadas a sus condiciones iniciales y de contorno.

En la dinámica de fluidos computacional (CFD), se pueden hacer aproximaciones de los rangos de longitudes turbulentas y de sus escalas por medio de un mallado extremadamente detallado. Por lo general, las mallas muy detalladas, poseen tiempos de resolución muy altos y un elevado coste computacional. En la actualidad se han generado diferentes modelos de turbulencia que predicen los efectos de la turbulencia sin recurrir a un mallado extremadamente fino.

Cabe destacar que los modelos de turbulencia son específicos para cada caso de estudio, no se puede hablar de un modelo de turbulencia universal aplicado a todos los casos de análisis.

## 6.7 Cascada de energía y escala de turbulencias

En el desarrollo de la turbulencia, los vórtices de mayor tamaño interactúan con el flujo principal y extraen energía de él. El tamaño o escala de estos vórtices es comparable a la escala del flujo. Sin embargo, estos vórtices son inestables y, por efecto de la cortadura o de la interacción entre ellos, tienden a dividirse en vórtices más pequeños que a su vez tienden a dividirse. Este proceso de rompimiento se produce en cascada, por lo que en un movimiento turbulento coexisten una gran variedad de escalas, correspondientes a distintos tamaños de vórtices, los cuales son arrastrados y estirados por la acción de los gradientes de velocidad del flujo medio dominante y por su interacción con los demás vórtices.

Este proceso de división continúa hasta que la escala de los vórtices es tan pequeña que el número de Reynolds de los mismos no es lo suficientemente grande como para que la inestabilidad persista. En estos vórtices pequeños, la energía cinética contenida en los vórtices se transforma en energía térmica por disipación viscosa. Al proceso completo se le denomina *cascada de energía*.

Habitualmente, esta variedad de remolinos o vórtices de diferentes escalas que existen en cualquier flujo turbulento se puede agrupar en tres escalas:

- *Macroescala*: es la escala asociada a los vórtices más grandes. El número de Reynolds asociado será el mismo que el del flujo principal:

$$R_e = \frac{V * L}{\nu} \quad (6. 23)$$

Las características de estos grandes torbellinos dependen de las condiciones de contorno del flujo y presentan un marcado carácter anisótropo (dependientes de la dirección).

- *Escalas intermedias*: son escalas inferiores a la macroescala en las que todavía no existe disipación de energía.

- *Microescala*: es la escala más pequeña, en la que se produce la disipación de energía.

### 6.7.1 Usos de los modelos de turbulencia

Para solucionar el problema de cierre, es decir, que existan más incógnitas que ecuaciones al resolver flujos turbulentos en las Ecuaciones de Navier-Stokes, es necesario utilizar un modelo de turbulencia. Estos modelos de turbulencia son modelos algebraicos donde la viscosidad turbulenta se modeliza mediante ecuaciones algebraicas, no siendo necesario integrar ecuaciones adicionales.

Entre los modelos de turbulencia más importantes que encontramos en los paquetes CFD, tenemos:

- Modelo de dos ecuaciones  $k - \varepsilon$
- Modelo RNG  $k - \varepsilon$
- Modelo RNG  $k - \omega$
- Shear Stress Transport
- Modelo LES (Large Eddy Simulation)

De manera general, se distinguen cuatro aproximaciones diferentes

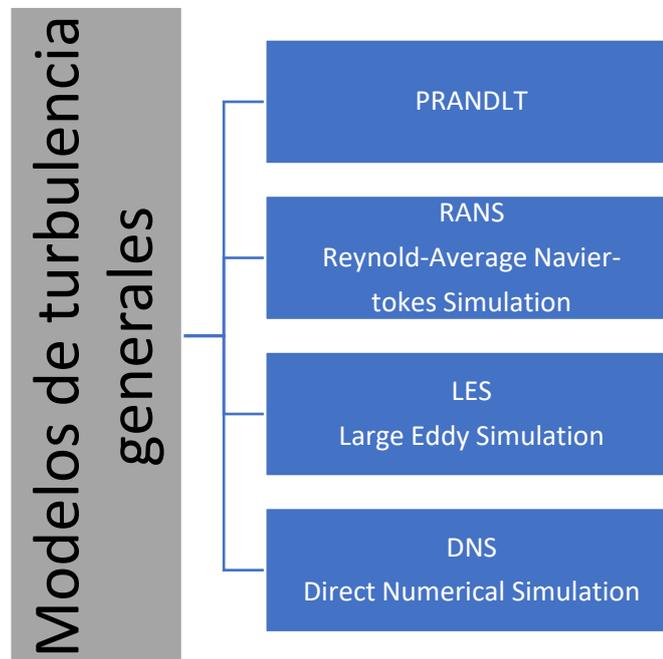


Figura 6. 3. Modelos de turbulencia generales. (Ortega, 2015)

### 6.7.2 Modelos de longitud de mezcla de Prandtl

La hipótesis de longitud de mezcla fue enunciada por Ludwig Prandtl (1875-1953) para capas límites bidimensional y representa la distancia media, perpendicular al flujo, a lo largo de la cual una partícula pierde su cantidad de movimiento extra y adquiere la velocidad media que exista en la nueva posición.

$$u_t = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \quad (6.24)$$

siendo:

- $l_m$ , longitud de mezcla, es un tamaño característico del flujo turbulento.

### 6.7.3 Simulación RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

Dentro de los modelos tipos RANS, se utiliza con mucha frecuencia la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la disipación de energía turbulenta ( $\varepsilon$ ), base para la solución del problema de cierre. La diferencia entre cada modelo se encuentra en la forma de aproximar las variables desconocidas.

La ventaja de los modelos RANS es que se emplea un promedio temporal sobre las ecuaciones de transporte y permite descomponer cualquier variable en su valor medio y en un valor fluctuante.

El efecto de las fluctuaciones turbulentas aparece en un término conocido como Tensiones de Reynolds.

### 6.7.4 Modelos de turbulencia de dos ecuaciones

Estos modelos de turbulencia se caracterizan porque es necesario integrar dos ecuaciones diferenciales adicionales para resolver el problema de cierre. Una corresponde a la energía cinética turbulenta  $k$  y la otra a la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta  $\varepsilon$ .

Estos modelos tienen su denominación en dichos términos, denominándose modelo  $k - \varepsilon$  y  $k - \omega$ . Son muy utilizados porque ofrecen una buena relación entre la capacidad computacional y la precisión numérica.

### 6.7.5 Modelo $k-\varepsilon$

Se considera el modelo estándar dentro de la aplicación de los códigos CFD.

Este modelo es un modelo semi-empírico basado en las ecuaciones de transporte. Establece una relación entre la energía cinética  $k_{ty}$  la disipación de energía de la misma  $\varepsilon_t$ , siendo su principal característica la consideración de un flujo totalmente turbulento y la desestimación de los efectos de viscosidad molecular.

Así, resuelve ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación viscosa, que se relaciona con la viscosidad turbulenta  $u_t$  según la siguiente función:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon\vec{v}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6.25)$$

$$u_t = \rho C_u \left( \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \quad (6.26)$$

donde:

- $\vec{v}_i$ , componente de velocidad en su correspondiente dirección
- $u_t$ , viscosidad del remolino

Los siguientes valores se han obtenido en fluido elementales (agua y aire) en condiciones de flujo turbulento:

$$C_u = 0.09$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$\sigma_k = 1.3$$

### 6.7.6 Modelo K- $\Omega$

El modelo k- $\Omega$  (Wilcox 1998) resuelve las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta  $k$  y la tasa específica de disipación viscosa  $\omega = \frac{\varepsilon}{k}$ , la cual se relacionan con la viscosidad turbulenta  $U_t$ .

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \vec{v}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2u_t s_{ij} s_{ij} - \rho \beta^* f_\beta k \omega \quad (6.27)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega \vec{v}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{u_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} G_k - \rho \beta f_\beta k \omega^2 \quad (6.28)$$

$$u_t = f \left( \frac{\rho k}{\omega} \right) \quad (6.29)$$

Este modelo de turbulencia incorpora pequeñas modificaciones a los principios fundamentales del modelo k- $\varepsilon$ , siendo más adecuado para número de Reynolds bajos.

### 6.7.7 Modelo Shear Stress Transport

La formulación de transporte de esfuerzo cortante (SST) combina lo mejor de los métodos k- $\omega$  y k- $\epsilon$ .

Por un lado, el uso de la formulación k- $\omega$  en las partes internas de la capa límite hace que el modelo se pueda utilizar directamente hasta la pared a través de la subcapa viscosa. Por otro lado, la formulación de SST cambia a un comportamiento k- $\epsilon$  en el flujo libre, evitando excesiva sensibilidad del modelo a las propiedades de turbulencia de flujo libre en la entrada.

Los autores que usan el modelo SST k- $\omega$  a menudo lo seleccionan por su buen comportamiento en gradientes de presión adversa y flujo de separación. El modelo SST k- $\omega$  produce niveles de turbulencia demasiado grandes en regiones con una tensión normal grande, como regiones de estancamiento y regiones con fuerte aceleración. Sin embargo, esta tendencia es mucho menos pronunciada que con un modelo de k- $\epsilon$ .

La formulación que define este modelo de turbulencia es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (6.30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_w \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_w - Y_w + S_w + D_w \quad (6.31)$$

donde:

- $G_k$ , generación de energía cinética turbulenta.
- $G_w$ , generación de w.
- $\Gamma_w, \Gamma_k$ , difusividad efectiva.
- $Y_w, Y_k$ , disipación de k y w.
- $D_w$ , término de difusión cruzada.
- $S_w, S_k$ , términos de origen definidos por el usuario.

### 6.7.8 Simulación de grandes remolinos (LES)

Este tipo de modelo permite resolver los vórtices de mayor escala, los cuales transportan entre el 50 y el 80 % de toda la energía cinética turbulenta, y para ello se requieren mallados más finos que RANS.

Estos modelos son intermedios entre la simulación directa y los modelos clásicos de turbulencia.

### 6.7.9 Simulación numérica directa

Requiere el uso de mallas extremadamente finas para resolver todas las escalas de turbulencia, el costo computacional es demasiado grande y está aplicando únicamente a flujos simplificados. Su aplicación para el caso de estructuras hidráulicas es casi inviable.

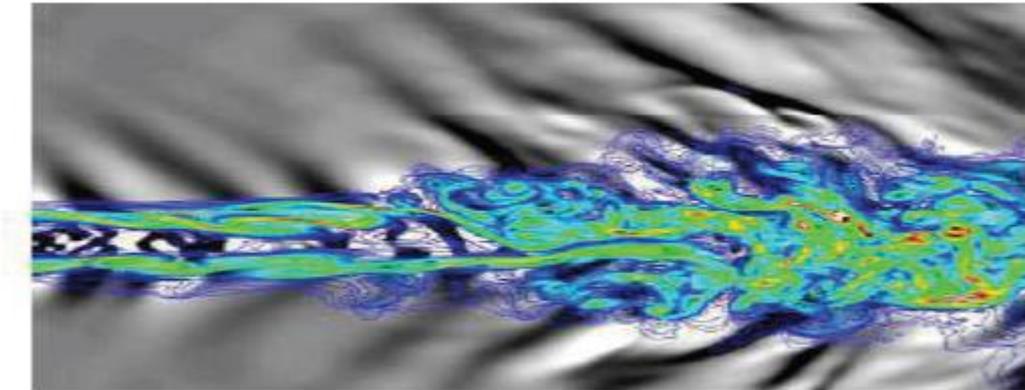


Figura 6. 4. Simulación numérica directa de un chorro. (Rafael Ballesteros,2011)

## 6.8 Conclusiones y recomendaciones

1. Dentro de la dinámica de fluidos computacional, es fundamental comprender las ecuaciones generales que rigen el movimiento de un fluido en tres dimensiones, su aplicación y correcta aplicación.
2. Las tensiones y ecuaciones de Reynolds, desde el punto de vista físico, resultan más prácticas porque parten de valores temporales medios cuyas magnitudes puede ser medidas por un observador mediante medios convencionales. Esto no sería posible si se utilizaran las ecuaciones de Navier-Stokes sin promedio.
3. No se puede hablar de un modelo de turbulencias universal, cada modelo tiene sus ventajas y limitaciones.
4. Los modelos RANS es un modelo muy utilizado debido a su estabilidad y robustez numérica, así como las prestaciones de cálculo.

# 7 Modelo numérico de un canal aplicando ANSYS CFX

---

## 7.1 Introducción a ANSYS 16.0

ANSYS es un código comercial, líder mundial en el desarrollo de simulaciones numérica tridimensionales que se caracteriza por la compra de los códigos CFX-4 y FLUENT. Estos códigos fueron pioneros en el desarrollo de herramientas de dinámica de fluidos computacional.

ANSYS permite simular un fenómeno físico del mundo real y representarlo en un dominio finito que será resuelto posteriormente por un ordenador, obteniendo resultados de la interacción del fluido con la estructura en un entorno visual amigable y de fácil comprensión.

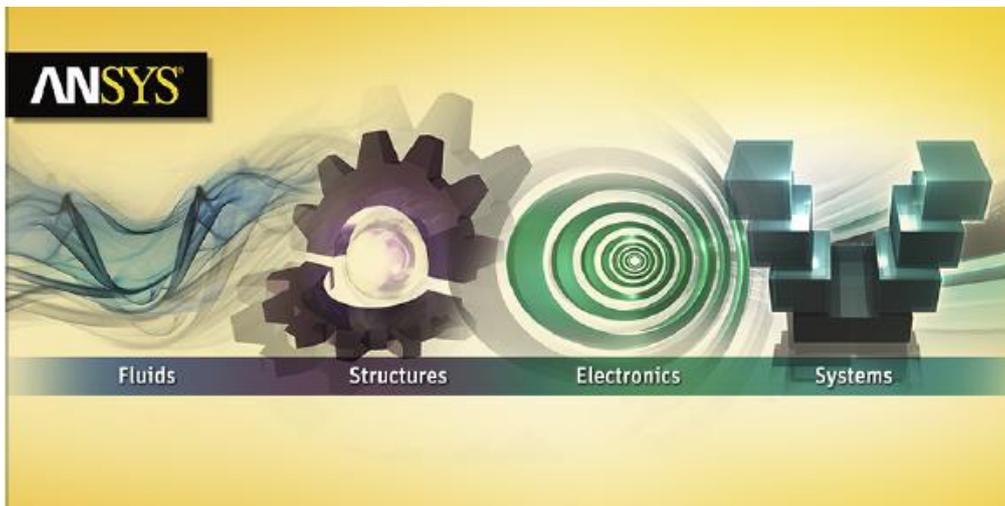


Figura 7. 1. Paquete de ANSYS.

## 7.2 ANSYS Workbench

La plataforma Workbench es la interfaz gráfica que permite interactuar con los métodos de resolución de ANSYS. Este presenta una vista esquemática del proceso completo de simulación, para ello utiliza un método de conectividad bidireccional CAD que facilita los análisis más complejos.

### 7.2.1 ANSYS CFX

Uno de los sistemas de análisis de ANSYS es el denominado CFX, esta herramienta se encarga de la dinámica de fluidos y de todos los análisis relacionados con los mismos. Puede resolver todo tipo de interacciones fluido-estructura, comportamientos de flujo, transferencia de calor, reacciones químicas y modelos bifásicos (aire-agua).

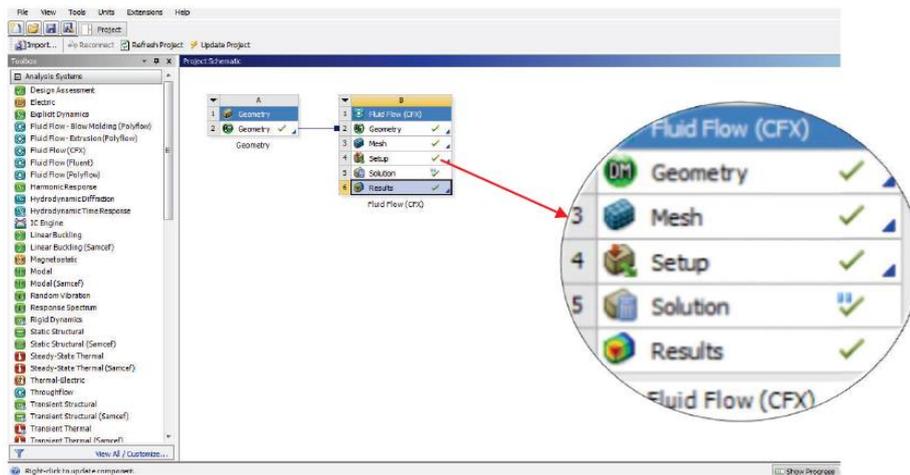


Figura 7. 2. Plataforma de trabajo de ANSYS CFX.

## 7.3 Módulos de ejecución de ANSYS CFX

ANSYS CFX, al igual que la mayoría de códigos comerciales y libres de metodología CFD, utiliza tres módulos básicos:

- Preproceso.
- Solver.
- Postproceso.

### 7.3.1 Módulo preproceso

Este módulo permite introducir los datos de entrada necesarios para continuar con el proceso de simulación. Este módulo comprende las siguientes fases:

1. Definición de la geometría que se va a modelar. Esta geometría es lo que el programa denomina dominio computacional finito, es decir, donde va a resolver numéricamente las ecuaciones que rigen el movimiento del fluido.
2. Definición del mallado. Se genera una malla que divide el dominio en un número de celdas, elementos o volúmenes de control finitos que abarcan todo el campo de estudio.
3. Definición de los fluidos que intervienen en la simulación, sus propiedades e identificación de los fenómenos de mayor y menor importancia que se pretenden simular, a fin de simplificar el modelo numérico.
4. Definición de las condiciones iniciales y las de contorno. Condiciones iniciales que rigen todo el proceso de simulación.

### 7.3.2 Módulo solver

Este módulo es el encargado de resolver de forma iterativa las ecuaciones en función de las condiciones establecidas en el preproceso.

En este módulo se debe indicar un aspecto muy importante a la hora de realizar una simulación numérica y es el tiempo de simulación del modelo. Este puede ir desde minutos, horas, días hasta semanas en tiempo real, en función de la complejidad del modelo y del tamaño de la malla.

### 7.3.3 Módulo postproceso

Esta fase permite visualizar de manera numérica y gráfica los resultados, pudiendo gestionar una gran cantidad de datos e información de manera sencilla.

Este módulo da la opción de representar de manera gráfica el dominio, mapas de contorno, planos y superficies, volúmenes, vectores, líneas de corriente, etc. También nos permite obtener animaciones de los resultados y ficheros Excel con los que trabajar posteriormente.

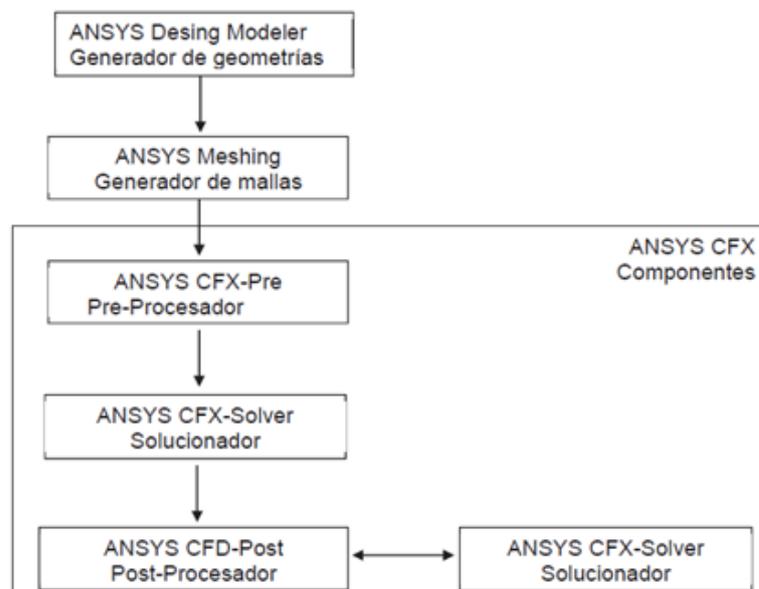


Figura 7. 3. Esquema estructurado de resolución numérica de ANSYS. (CFX, 2014)

## 7.4 Métodos de resolución numérica en ANSYS CFX, secuencia y estructura

Como hemos mencionado anteriormente, el objetivo de un código CFD es la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes. Dado que estas ecuaciones constituyen un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineal, se procede, mediante discretización espacial, a la transformación de dichas ecuaciones en ecuaciones algebraicas en determinados puntos del dominio físico (los nodos del mallado).

### 7.4.1 Método de los volúmenes finitos

ANSYS CFX es un código comercial de dinámica de fluidos computacional cuya resolución numérica se basa en el método de los volúmenes finitos. Este método realiza una división del espacio en volúmenes de control para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes en forma integral.

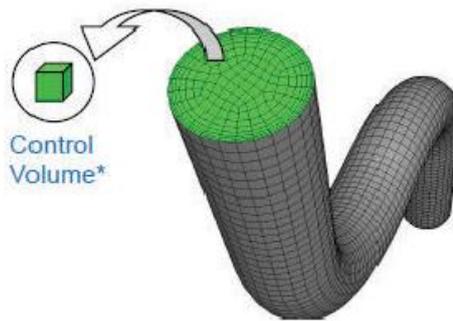


Figura 7. 4. Discretización del dominio. (CFX,2014)

La principal ventaja del método de los volúmenes finitos es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas. Este método es muy flexible, pudiendo implementarse en mallas no estructuradas y estructuradas.

### 7.4.2 Tipos de análisis

Existen dos tipos de análisis que se deben considerar dependiendo del problema a resolver, estos son el análisis en régimen permanente (steady) y el transitorio (transient). La elección correcta del tipo de análisis favorece la convergencia a la hora de conseguir un resultado.

En el análisis en régimen permanente, las características del flujo no dependen ni cambian respecto al tiempo, alcanzando la estabilidad después de un periodo de tiempo determinado.

En cambio, en el análisis transitorio sí que existe una dependencia entre el tiempo de simulación y la obtención de un resultado. Sin embargo, este supone una mayor capacidad de procesamiento computacional.

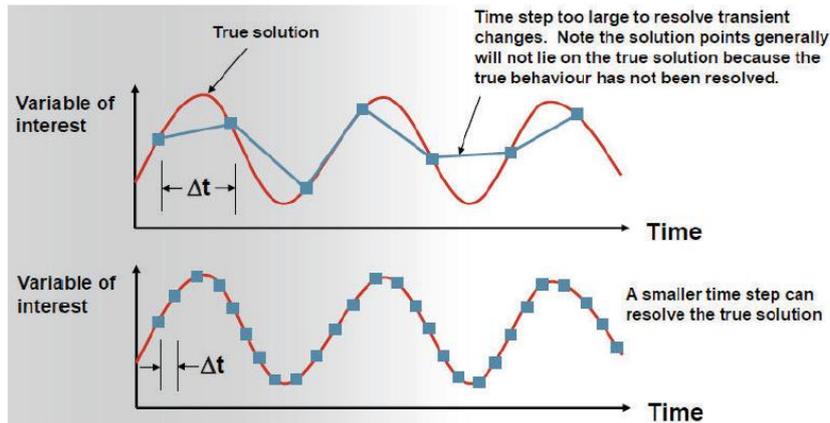


Figura 7. 5. Time step. Solución real vs solución numérica. (CFX,2014)

## 7.5 Mallado del dominio de estudio

Uno de los aspectos más importantes, a la hora de realizar una simulación numérica tridimensional en una geometría específica, es el tipo y tamaño del mallado.

Realizar un mallado no es más que discretizar el dominio físico en un número finito de celdas, estando dichas celdas limitadas por un número de superficies.

Así, es importante seleccionar el tipo de malla en función del código CFD que se esté usando, ya que ninguna simulación puede realizarse sin haber definido una malla con una distribución de puntos adecuada. A la hora de elegir el tipo de mallado, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tiempo necesario para crear el mallado.
- Coste computacional. Un mallado más detallado, exige unas mayores prestaciones computacionales.
- Efecto de la difusión numérica.

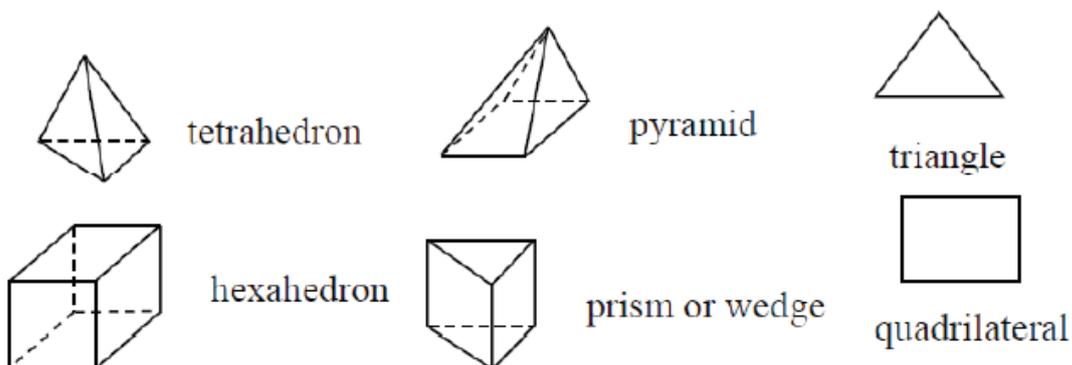


Figura 7. 6. Formas geométricas de volúmenes para el mallado en ANSYS CFX. (Fernández, 2008)

Existen dos tipos de mallados para elegir en función del código CFD y de la conectividad entre los nodos de las celdas.

### 7.5.1 Mallas estructuradas

La principal ventaja de los mallados estructurados reside en la ordenación de los elementos en la memoria ya que, de esta forma, el acceso a las celdas vecinas a una dada resulta muy rápido y fácil, sin más que sumar o restar un número al valor del índice correspondiente.

Las mallas estructuradas pueden representarse en un sistema cartesiano o curvilíneo. En el primer caso, las líneas que configuran las celdas son siempre paralelas al sistema de ejes coordenados; por el contrario, en los sistemas curvilíneos, el sistema de coordenadas es deformado para adaptarse a la geometría del objeto de estudio.

Por otro lado, también pueden clasificarse en mallas ortogonales y mallas no ortogonales. Las mallas ortogonales son aquellas en las que todas las líneas que la configuran se cortan entre sí con un ángulo de 90 grados. Algunos flujos pueden considerarse como axisimétricos; en estos casos, las ecuaciones de flujo pueden ser expresadas en coordenadas polares, en vez de en coordenadas cartesianas.

Cabe destacar que las mallas estructuradas, presentan mejores prestaciones en tiempo de cálculo, memoria computacional y precisión numérica.

### 7.5.2 Mallas no estructuradas

El segundo tipo de mallas, son los mallados no estructurados. Estos ofrecen gran flexibilidad en el tratamiento de geometría complejas. La principal ventaja de estos mallados reside en que los elementos, se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. En la práctica, es necesario determinar unos parámetros adecuadamente para obtener una buena calidad de malla.

El tiempo requerido por un ordenador para generar una malla no estructurada es mucho menor que el que requiere uno estructurado.

Otra ventaja para este tipo de metodología es que la solución obtenida depende del refinamiento que se produce en la malla. Una desventaja es que el espacio que ocupa la malla es mayor, requiriendo una mayor capacidad de almacenamiento del ordenador.

### 7.5.3 Calidad del mallado

Un mallado correcto debe presentar una suavidad en sus elementos y una adecuada continuidad.

Para evaluar un mallado, existen ciertos parámetros que indican la calidad del mallado. Entre los más importantes tenemos:

- Distorsión de las celdas.
- Relación de aspecto  $\Delta x/\Delta y$ .
- Factor de distorsión. Mide el ángulo entre dos caras adyacentes de una celda.

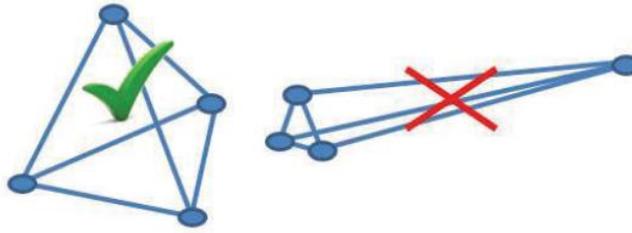


Figura 7. 7. Consideraciones de calidad de un mallado (Ortega, 2015).

## 7.6 Condiciones de contorno del modelo numérico

Las condiciones de contorno establecen las condiciones de los bordes del dominio que vamos a estudiar. Estas se definen para cualquier tipo de modelo, sea este unidimensional, bidimensional o tridimensional, siendo en todos los casos muy influyentes en los resultados de la modelación.

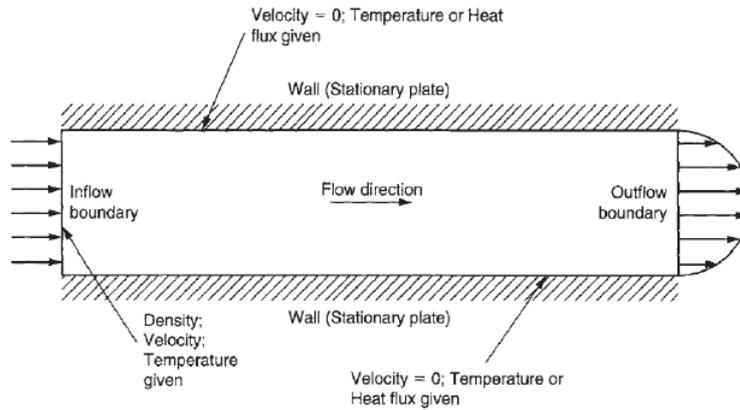


Figura 7. 8. Esquema de las condiciones frontera. (Ortega, 2015)

# 8 Simulación numérica del resalto hidráulico

---

En este apartado se va a explicar el proceso realizado para llegar a simular el resalto hidráulico que se produce en un canal para unas condiciones de contorno determinadas.

## 8.1 Construcción de la geometría

Debido a la simplicidad de la estructura a simular, se ha decidido hacer uso de las herramientas que ANSYS CFX ofrece para el diseño de la geometría.

Dentro de la herramienta *Geometry Design Modeler*, también introduciremos las superficies que se convertirá en condiciones de contorno posteriormente.

Cabe destacar que, por limitaciones en la cantidad de nodos a analizar por la licencia de ANSYS disponible para la elaboración de este Trabajo Fin de Máster, se ha decidido simular el canal como un rectángulo simple de ancho cinco veces el tamaño de una celda del mallado (Figura 8.1).

En lo que a la longitud del canal respecta, se ha considerado simular únicamente la parte del canal tras la compuerta. Para determinar la longitud, se han sumado 0.5 metros a la longitud de resalto medida en laboratorio, asegurando que la situación sea completamente estable al final del mismo.

De esta forma se ha conseguido reducir el dominio fluido a simular, permitiendo un menor tamaño de celda en el mallado, una mayor precisión y una mayor rapidez en la resolución del sistema.

Cabe destacar que, puesto que el canal ha sido simulado a partir de la compuerta existente en laboratorio, sin la existencia de la misma, el resalto se provocará estableciendo como condiciones de contorno el calado supercrítico y el subcrítico.

Los materiales con los que está construido el canal son:

- Acero pulido para la solera del canal.
- Cristal para las paredes laterales del canal.

Estos materiales se han tenido en cuenta a la hora de introducir los coeficientes de rugosidad de las superficies.

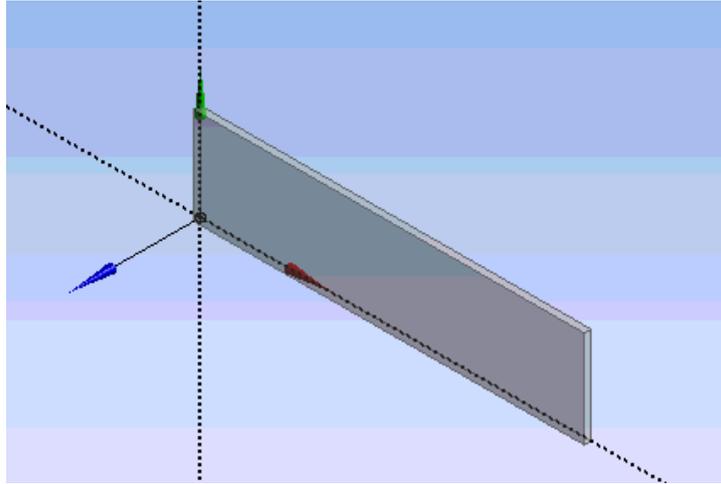


Figura 8. 1. Geometría en ANSYS.

## 8.2 Mallado del dominio

Para la construcción del mallado, ANSYS CFX presenta la herramienta *Meshing*. Esta permite elaborar un mallado automático utilizando el comando *Generate Mesh*, generando un mallado no estructurado por defecto.

Cabe destacar que una malla predominantemente tetraédrica requiere en torno a 1 GHz de memoria de memoria RAM por un millón de elementos, mientras que la malla hexaédrica requiere 1 GHz por cada cien mil elementos.

Para el presente trabajo se ha optado por un mallado estructurado hexaédrico (tipo Sweep).

Se realizarán simulaciones para mallados con un tamaño de celda de 3, 5 y 7 mm con el fin de analizar los resultados y demostrar que un adecuado refinamiento del mallado es completamente decisivo en la obtención de unos resultados precisos.

El mallado obtenido para un tamaño de celda 7 mm es el siguiente:

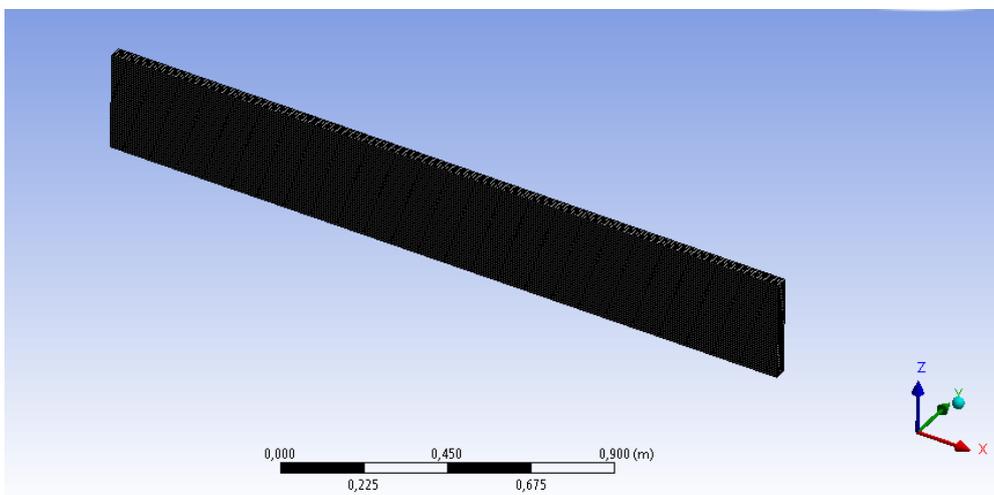


Figura 8. 2. Mallado estructurado de 7 mm.

## 8.3 Expresiones

ANSYS CFX posee un sinnúmero de variables y comandos que se pueden configurar de acuerdo a las necesidades de cálculo y procesamiento de resultados.

La configuración de estas variables se lleva a cabo mediante el uso de lo que se conoce como *Expresiones*. Estas expresiones serán utilizadas para definir las condiciones iniciales, así como las condiciones de presión y calado existentes en las condiciones de contorno y en la situación inicial.

Para la presente simulación, caudal de 67.4 m<sup>3</sup>/s y número de Froude 5.73, se han utilizado las siguientes expresiones:

<b>Nombre</b>	<b>Definición</b>	<b>Valor</b>
<b>DownH</b>	Calado aguas abajo	0,17 [m]
<b>UpH</b>	Calado aguas arriba	0,0225 [m]
<b>DenWater</b>	Densidad del agua	997 [kg m <sup>-3</sup> ]
<b>DenRef</b>	Densidad de referencia	1.185 [kg m <sup>-3</sup> ]
<b>DenH</b>	Densidad total del fluido	DenWater-DenRef
<b>UpVFAir</b>	Volumen aguas arriba de la fracción de aire	Step((y-UpH) / 1 [m]
<b>UpVFWater</b>	Volumen aguas arriba de la fracción de agua	1 - UpVFAir
<b>UpPres</b>	Presión total aguas arriba	DenH*g*UpVFWater*(UpH-y)
<b>DownVFAir</b>	Volumen aguas abajo de la fracción de aire	Step((y-DownH) / 1 [m]
<b>DownVFWater</b>	Volumen aguas abajo de la fracción de agua	1 - DownVFAir
<b>DownPres</b>	Presión aguas abajo	DenH*g*DownVFWater*(DownH-y)

Tabla 8. 1. Expresiones introducidas en ANSYS.

## 8.4 Dominio y condiciones de contorno

Una vez realizado el mallado, se procede a configurar las características a representar, tipo de simulación, condiciones de contorno (inlet, opening, simmetry, wall), propiedades de los fluidos, materiales de la estructura, propiedades y parámetros físicos.

Para esto se debe ingresar dentro de ANSYS CFX en la herramienta *Setup*, donde se pueden configurar todos estos parámetros para la simulación.

Al ser una simulación de un fluido bifásico, se consideran dos fluidos: agua y aire. El flujo es a superficie libre, por lo que las principales fuerzas actuantes son las fuerzas por acción de la gravedad.

Las características físicas y de los fluidos se detallan a continuación en la siguiente tabla:

<b>Características físicas de los fluidos</b>	
<b>Fluidos</b>	Agua
	Aire
<b>Presión de referencia</b>	1 atmósfera
<b>Buoyant Model</b>	Sí
<b>Gravedad en X</b>	0 m/s <sup>2</sup>
<b>Gravedad en Y</b>	-g m/s <sup>2</sup>
<b>Gravedad en Z</b>	0 m/s <sup>2</sup>
<b>Buoyant Density</b>	DenRef
<b>Multifase</b>	Modelo Homogéneo
<b>Transferencia de calor</b>	No
<b>Agua y Aire</b>	Fluido continuo

Tabla 8. 2. Características físicas de los fluidos

Para este trabajo, las condiciones de contorno son las condiciones de entrada, salida, condiciones de pared y condiciones de atmósfera. Las condiciones de entrada y salida corresponden al inicio y final de canal donde se produce la entrada y salida del fluido, respectivamente. Las condiciones de pared corresponden a la solera y paredes laterales del canal.

<b>Condiciones de contorno Entrada</b>	
<b>Tipo</b>	INLET
<b>Ubicación</b>	Inlet
<b>Dirección del flujo</b>	Normal
<b>Parámetro</b>	Bulk Mass Flow Rate
<b>Valor</b>	2.113 [kgs <sup>-1</sup> ]
<b>Fluido</b>	Water
<b>Fracción Volumétrica</b>	UpVFWater
<b>Fluido</b>	Air
<b>Fracción Volumétrica</b>	UpVFAir

Tabla 8. 3. Condiciones de contorno entrada.

<b>Condiciones contorno Salida</b>	
<b>Tipo</b>	OPENING
<b>Ubicación</b>	Opening
<b>Masa y Momento</b>	Opening Pres, and Dirn

<b>Dirección del flujo</b>	Normal
<b>Fluido</b>	Water
<b>Fracción Volumétrica</b>	DownVFWater
<b>Fluido</b>	Air
<b>Fracción Volumétrica</b>	DownVFAir

Tabla 8. 4. Condiciones de contorno salida.

<b>Condiciones de contorno Superficie Libre</b>	
<b>Tipo</b>	OPENING
<b>Ubicación</b>	Sky
<b>Masa y Momento</b>	Entrainment
<b>Presión relativa</b>	0 [Pa]
<b>Fluido</b>	Water
<b>Fracción Volumétrica</b>	0
<b>Fluido</b>	Air
<b>Fracción Volumétrica</b>	1

Tabla 8. 5. Condiciones de contorno Superficie Libre.

<b>Condiciones de contorno Solera</b>	
<b>Tipo</b>	WALL
<b>Ubicación</b>	Back
<b>Masa y Momento</b>	No Slip wall
<b>Rugosidad</b>	0,03 mm

Tabla 8. 6. Condiciones frontera Solera.

<b>Condiciones frontera Paredes Laterales</b>	
<b>Tipo</b>	SIMMETRY
<b>Ubicación</b>	Simmetry

Tabla 8. 7. Condiciones frontera Paredes Laterales.

A continuación, en la siguiente figura, se muestran las condiciones de contorno para nuestro canal y un caudal de  $67,4 \text{ m}^3/\text{s}$ :

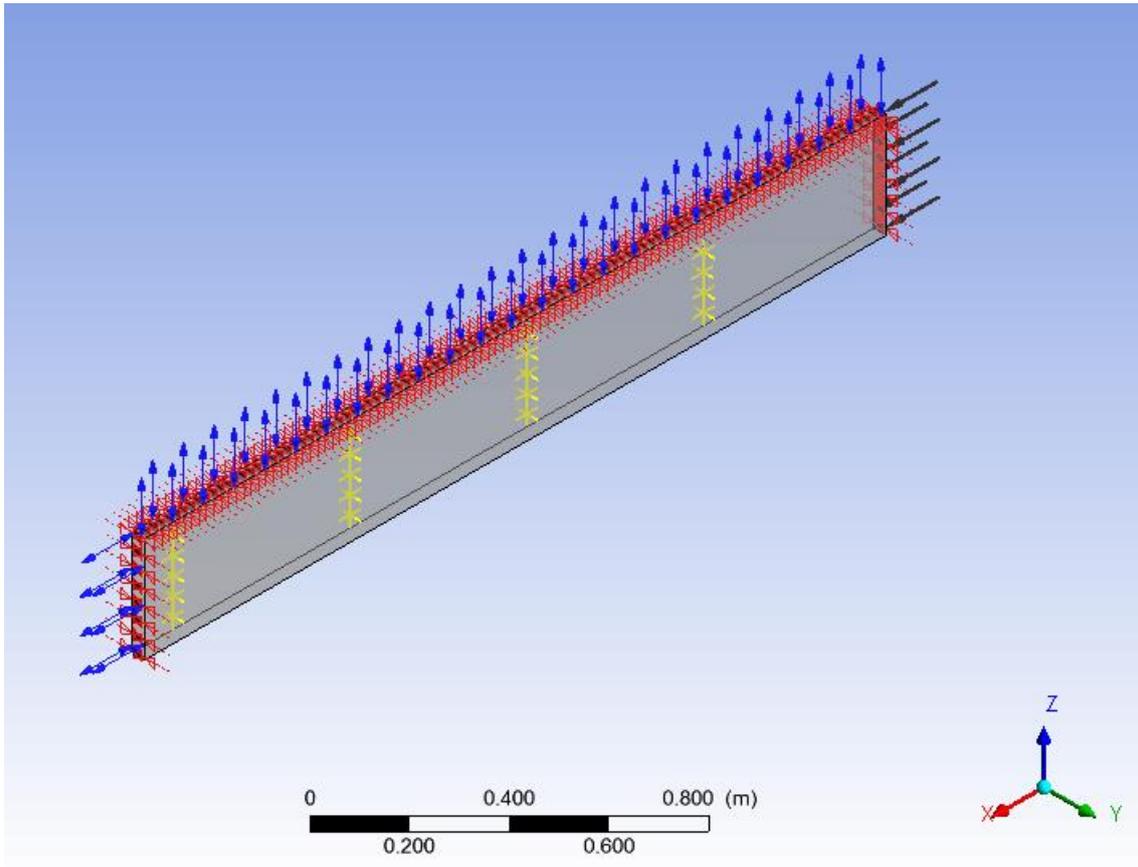


Figura 8. 3. Condiciones de contorno en el canal hidráulico. Fuente: ANSYS CFX 15.0.

## 8.5 Tipo de análisis

En este trabajo se ha realizado la simulación del resalto en tres escenarios distintos. Dos de ellos se corresponden a un régimen permanente al que se aplicarán dos modelos de turbulencia diferentes y el otro se corresponde a un análisis transitorio.

El fin de simular diferentes escenarios es poder compararlo y obtener una conclusión sobre qué tipo de análisis es el que se ajusta mejor a los datos obtenidos en laboratorio.

De manera independiente a los resultados obtenidos, como era de esperar, el tipo de análisis transitorio ha necesitado un tiempo de simulación mayor para converger y proporcionar unos resultados estables. Las simulaciones para calibrar el modelo han tardado en finalizar entre 5-7 días.

A continuación, se resumen los tipos de análisis contemplados y utilizados en ANSYS:

<b>Escenario 1</b>	
<b>Tipo de análisis</b>	Régimen permanente
<b>Modelo de Turbulencia</b>	k-ε

<b>Escenario 2</b>	
<b>Tipo de análisis</b>	Régimen permanente
<b>Modelo de Turbulencia</b>	Shear Stress Transport

<b>Escenario 3</b>	
<b>Tipo de análisis</b>	Régimen Transitorio
<b>Tiempo total</b>	30 s
<b>Intervalo de paso</b>	0.01 s
<b>Modelo de Turbulencia</b>	Shear Stress Transport

*Tabla 8. 8. Tipo de análisis utilizados en ANSYS para realizar las distintas simulaciones.*

El intervalo de paso o intervalo de tiempo entre dos instantes es la elección más importante en el análisis transitorio. Cuanto menor sea el paso, mayor será la convergencia y precisión, pero por contra, será necesario más tiempo para la resolución del algoritmo.

En este Trabajo Fin de Máster, el intervalo de paso varía para cada uno de los mallados que hemos utilizado. Pues este se define como la relación entre la velocidad máxima y el tamaño de celda de la malla.

## 8.6 Condiciones iniciales a considerar

Con el fin de reducir el tiempo necesario de simulación y aumentar la precisión en la obtención de resultado, se ha decidido ingresar unas condiciones de inicialización para el modelo. Las condiciones introducidas han sido las siguientes:

<b>Condiciones iniciales en Análisis transitorio</b>	
<b>Tipo de velocidad</b>	Cartesiana
<b>Componentes cartesianas de velocidad</b>	Automático
<b>Presión estática</b>	DownPres
<b>Volumen de fracción de agua</b>	DownVFWater
<b>Volumen de fracción de aire</b>	DownVFAir

*Tabla 8. 9. Condiciones iniciales de la simulación.*

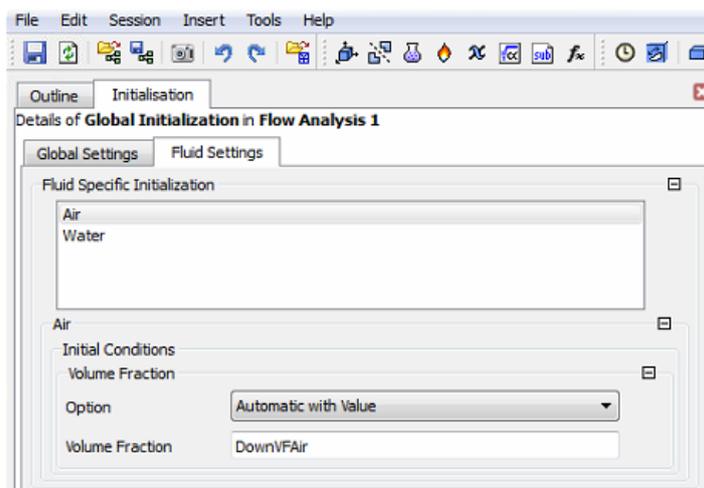


Figura 8. 4. Condiciones iniciales de aire en análisis transitorio

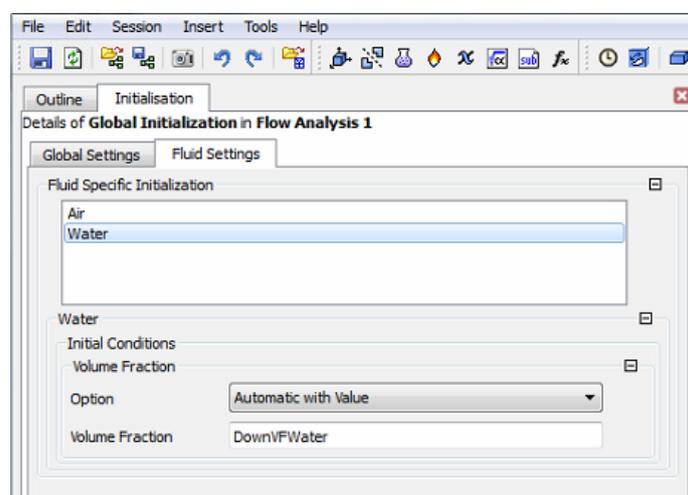


Figura 8. 5. Condiciones iniciales de agua en análisis transitorio.

<b>Condiciones iniciales en Análisis</b>	
<b>Tipo de velocidad</b>	Cartesiana
<b>Componentes cartesianas de velocidad</b>	$U = 2.69 \text{ m/s}$ ; $V = 0$ ; $W = 0$
<b>Presión estática</b>	DownPres
<b>Volumen de fracción de agua</b>	DownVFWater
<b>Volumen de fracción de aire</b>	DownVFAir

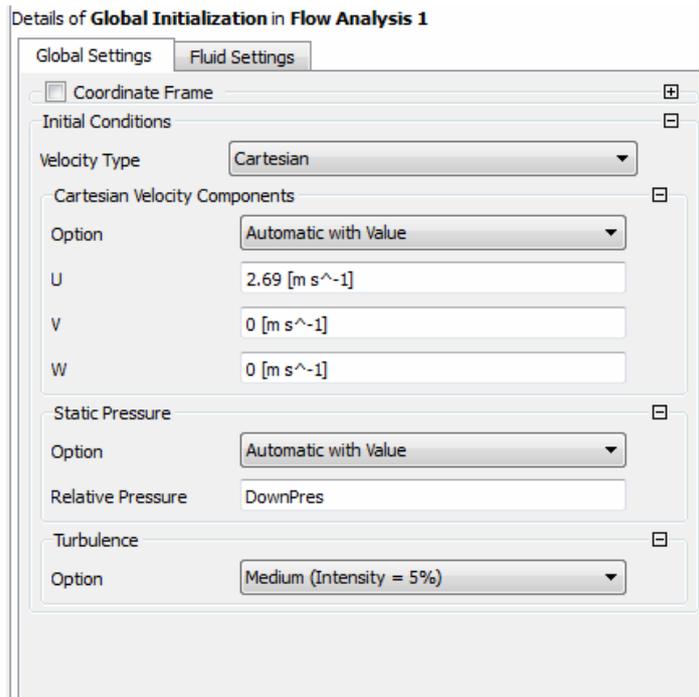


Figura 8. 6. Condiciones globales de iniciación de simulación en análisis transitorio.

## 9 Resultados experimentales

En este apartado se recogen los resultados relativos a las mediciones realizadas en laboratorio.

En un primer lugar se va a realizar una comparativa del valor de calado subcrítico obtenido en el laboratorio con el valor obtenido mediante fórmulas empíricas. Seguidamente se realizará una comparativa para la longitud de resalto, haciendo uso de varios metidos y se calculará la pérdida de energía producida durante el resalto y la eficiencia del mismo.

Por último, se mostrarán los perfiles de velocidad obtenidos para todos los resaltos analizados con ADV, tras realizar el filtrado de los registros que se obtuvieron en laboratorio y eliminar valores anómalos.

### 9.1 Calado conjugado

Tomando como base los estudios de García (2008) y Vicente (2008), se realiza la comparación de los resultados medidos en laboratorio con los obtenidos haciendo uso de la Ecuación de Bélanger:

<b>Nº de Froude</b>	<b>Q (m³/h)</b>	<b>U<sub>1</sub> (m/s)</b>	<b>y<sub>2lab</sub> (m)</b>	<b>y<sub>2</sub> Bélanger (m)</b>	<b>% diferencia</b>
<b>7,56</b>	39	2,697	0,126	<b>0,133</b>	<b>-5,26</b>
<b>6,19</b>	47,8	2,528	0,133	<b>0,141</b>	<b>-5,67</b>
<b>4,55</b>	50	2,091	0,130	<b>0,128</b>	<b>1,56</b>
<b>5,19</b>	55	2,354	0,145	<b>0,144</b>	<b>0,69</b>
<b>4,36</b>	60	2,157	0,150	<b>0,142</b>	<b>5,63</b>
<b>5,73</b>	67,4	2,693	0,170	<b>0,172</b>	<b>-1,16</b>

Tabla 9. 1. Comparación de calado subcrítico

Vemos que la diferencia entre el valor teórico y el medido en laboratorio es de +/- 5% , por lo que podemos tomar los datos medidos en laboratorio como válidos.

Por otro lado, conociendo el número de *Froude* (*Fr*) del flujo entrante y haciendo uso de los estudios del U. S Bureau of Reclamation, podemos proceder a la clasificación de los resaltos hidráulicos estudiados (Figura 9.2):

<b>F<sub>r1</sub></b>	<b>Q (m³/h)</b>	<b>Tipo de resalto</b>
<b>7,56</b>	39	<i>Estable</i>
<b>6,19</b>	47,8	<i>Estable</i>
<b>4,55</b>	50	<i>Estable</i>
<b>5,19</b>	55	<i>Estable</i>
<b>4,36</b>	60	<i>Oscilante</i>
<b>5,73</b>	67,4	<i>Estable</i>

Tabla 9. 2. Clasificación resaltos hidráulicos de acuerdo U. S Bureau of Reclamation.

## 9.2 Longitud del resalto

De acuerdo con lo mencionado en el apartado anterior, el cálculo de la longitud de resalto se ha realizado haciendo uso de distintas metodologías. Por un lado, haremos uso de la ecuación de Silvester (ecuación 4.36) y, por otro, de la gráfica del U.S Bureau of Reclamation (Figura 9.1).

De este modo, los resultados obtenidos para la longitud teórica de resalto son los siguientes (Tabla 9.3):

$F_{r1}$	$L_m$ medido (m)	$L_r$ Silvester	% dif Silvester	$L/y_2$ USBR	$L_r$ USBR (m)	% dif USBR
7,56	0,870	0,847	2,75	6,150	0,815	6,71
6,19	0,930	0,875	6,29	6,150	0,865	7,53
4,55	0,840	0,755	11,31	5,900	0,756	11,10
5,19	0,920	0,870	5,72	6,050	0,871	5,61
4,36	0,940	0,829	13,43	5,800	0,824	14,04
5,74	1,20	1,055	16,59	6,100	1,047	17,52

Tabla 9. 3Longitudes de resalto teóricas y reales.

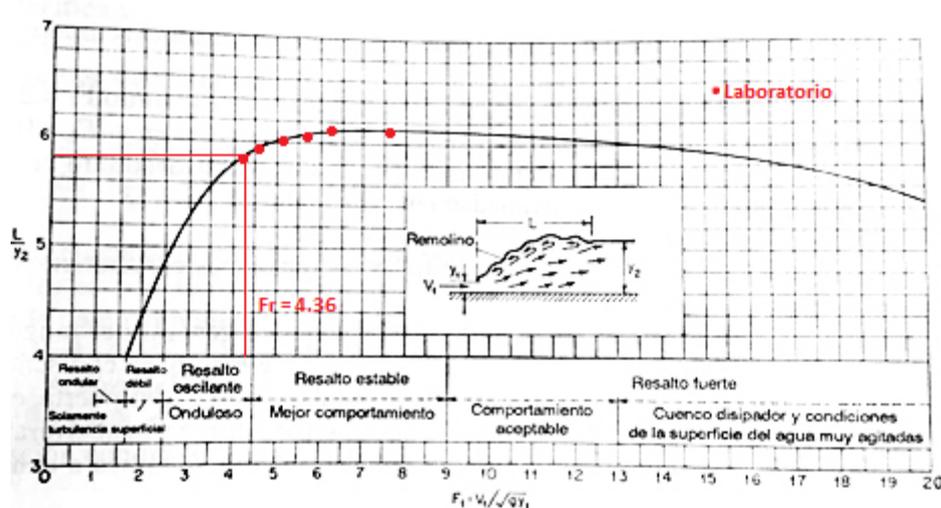


Figura 9. 1. Comparación de longitud obtenida en términos de la profundidad  $y_2$  de resaltos en canales horizontales, con base del U. S. Bureau of Reclamation. (Ven Te Chow,2000).

A continuación, se procede a la representación gráfica de los resultados para un mejor análisis de los mismos:

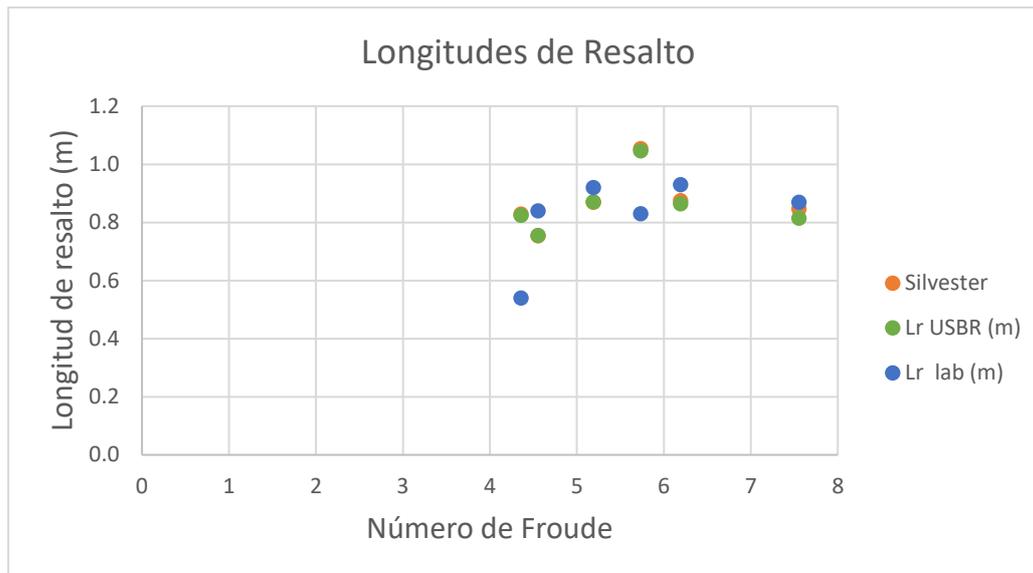


Figura 9. 2. Comparación de longitud de resalto

Conforme a lo esperado, se observa que la variación entre los métodos de cálculo de la longitud de resalto es reducida, siendo mucho mayor la diferencia con la longitud medida en laboratorio. Esta mayor diferencia se puede asociar a la gran dificultad para determinar en laboratorio el fin del resalto.

En la Figura 9.3 se obtienen las siguientes distancias desde el pie del salto hidráulico hasta la sección transversal aguas abajo, en la que ha desaparecido el efecto del resalto hidráulico sobre la distribución de velocidades. En la Figura 9.4 se comparan los resultados de Leuthesser Kartha (1972) con las mediciones realizadas en laboratorio:

$F_{r1}$	$L^*$ laboratorio (m)	$L/y_2$ Leuthesser Kartha	$L^*$ Leuthesser Kartha (m)	% diferencia
7,56	1,50	12,00	1,59	-5,70
6,19	1,40	12,00	1,69	-17,04
4,55	1,35	11,70	1,50	-9,96
5,19	1,65	11,80	1,70	-2,89
4,36	1,50	11,50	1,63	-8,22
5,73	1,95	11,90	2,04	-4,49

Tabla 9. 4. Longitud hasta desaparición del efecto del resalto

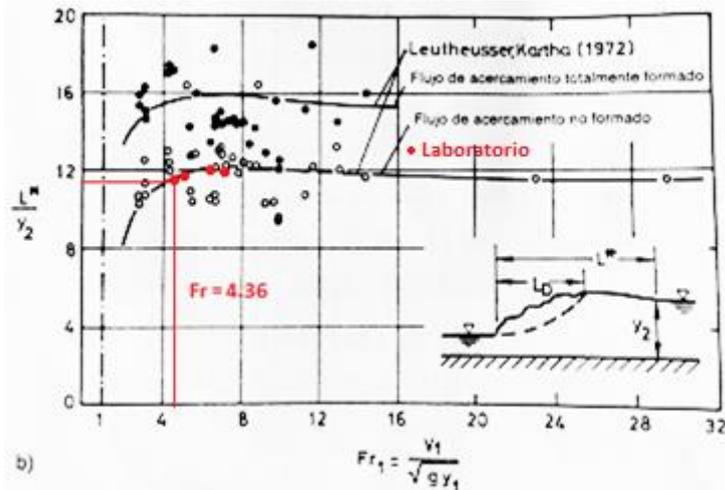


Figura 9. 3. Distancias obtenidas hasta la desaparición del efecto del resalto hidráulico. (Naudascher, 2001)

Y la representación gráfica es la siguiente:

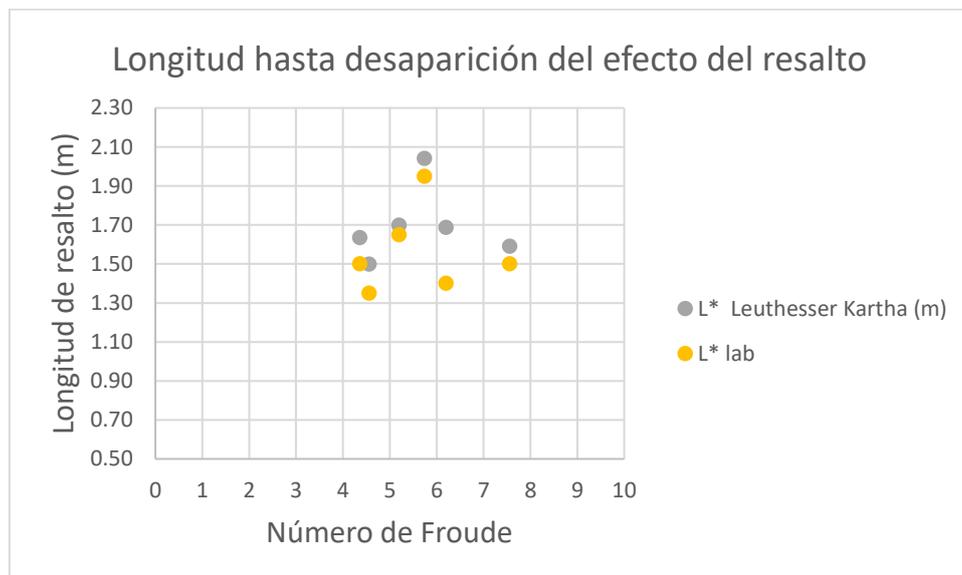


Tabla 9. 5. Longitud hasta desaparición del efecto del resalto

Se observa que los valores tomados en laboratorio se encuentran muy próximos a los valores propuestos por Leuthesser Kartha (1972).

### 9.3 Pérdida de energía y eficiencia

En el resalto hidráulico la pérdida de energía se define como la diferencia de la energía específica antes y después de resalto.

En este apartado, la disipación de energía existente en los resaltos hidráulicos se calcula haciendo uso de la ecuación 4.31. En la tabla 9.6 se visualiza el cálculo de la pérdida de energía:

$F_{r1}$	$Q$ (m <sup>3</sup> /h)	$y_1$ (m)	$y_2$ (m)	$E_1$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$E_2$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\Delta H_{lab}$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
7,56	39	0,013	0,133	0,384	0,136	0,248
6,19	47,8	0,017	0,141	0,343	0,145	0,197
4,55	50	0,022	0,128	0,244	0,134	0,109
5,19	55	0,021	0,144	0,304	0,150	0,154
4,36	60	0,025	0,142	0,262	0,149	0,113
5,73	67,4	0,023	0,172	0,392	0,178	0,214

Tabla 9. 6. Disipación de energía

Estos valores son comparados con los resultados experimentales del *U.S Bureau of Reclamation* (1964). La Figura 9.4 muestra la pérdida de energía originada en el resalto hidráulico  $\Delta H$ , en relación con la altura de energía específica de entrada ( $H_0$ ).

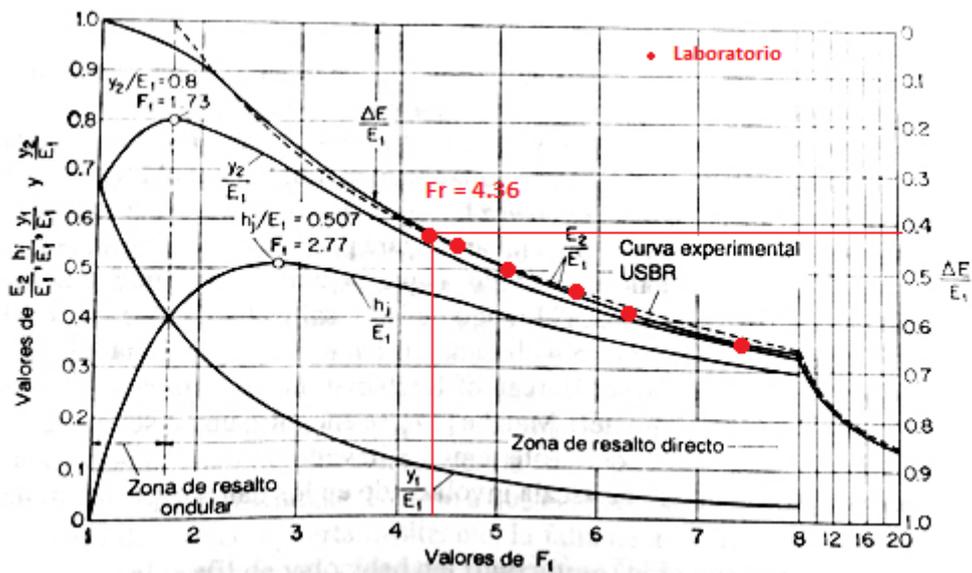


Figura 9. 4. Disipación de energía obtenida de acuerdo a *U. S Bureau of Reclamation*. (Naudascher, 2001)

Los resultados obtenidos de la Figura 9.4:

$Q$ (m <sup>3</sup> /h)	$F_{r1}$	$y_0$ (m)	$\Delta H/ y_0$	$\Delta H$ (Energía Específica/ USBR)	$\Delta H_{lab}$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	% diferencia
39	7,56	0,4	0,64	0,256	0,248	-3,1
47,8	6,19	0,4075	0,59	0,240	0,197	-17,9
50	4,55	0,24	0,45	0,108	0,109	0,9
55	5,19	0,2855	0,54	0,154	0,154	0,0
60	4,36	0,2565	0,43	0,110	0,113	2,7
67,4	5,73	0,42	0,53	0,223	0,214	-4,0

Tabla 9. 7. Disipación de energía según *U. S Bureau of Reclamation*

Se observa una gran cercanía entre los resultados obtenidos, utilizando los dos métodos de cálculo

Calculada la pérdida de energía, también se ha procedido al cálculo de la eficiencia. La eficiencia de un resalto hidráulico se define como la relación entre la energía específica antes y después del resalto. Puede demostrarse que la eficiencia es:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (9.1)$$

Conforme a la ecuación anterior, la eficiencia para los resaltos objeto de este estudio son las siguientes:

Q (m <sup>3</sup> /h)	F <sub>r1</sub>	% Eficiencia
33,5	9,34	29%
39	7,56	35%
47,8	6,19	42%
50	4,55	55%
55	5,19	49%
60	4,36	57%
67,4	5,73	45%

Tabla 9. 8. Eficiencia resalto hidráulico

## 9.4 GRÁFICAS DE VELOCIDAD FRENTE A CALADO

A partir de los datos recogidos en el Anexo I, se representan a continuación los perfiles de velocidad clasificados por secciones muestreadas y caudal de trabajo para cada resalto hidráulico analizado con ADV.

El muestreo ha sido realizado a una frecuencia de 5 Hz y seguidamente se realizaron los filtrados a los registros que requiriesen la eliminación de datos anómalos con el fin de homogeneizarlas.

Como se puede observar, el número de secciones y puntos muestreados varía según el caudal circulante. Esto se debe a que, para los caudales más pequeños, en algunas secciones el calado ha sido insuficiente para poder realizar mediciones con el equipo Doppler (medido a 5 cm del equipo). El porcentaje de calado hasta el que se ha podido obtener medidas también es variable.

La velocidad es más alta en las secciones iniciales del resalto. Esto se debe a la influencia del chorro de pared saliente de la compuerta, y por ese motivo se localizan en los porcentajes de calado bajos. Se observa por regla general un descenso rápido de las velocidades con el incremento de calado.

Igualmente, observamos que, al muestrear las secciones más alejadas de la compuerta, y aun en el seno del resalto, las velocidades van siendo cada vez más bajas conforme nos distanciamos de la compuerta. Esta disminución de velocidad refleja la disipación de energía dentro del resalto hidráulico. En estas secciones, la disminución de velocidad es mucho más paulatina, llegando incluso a estabilizarse en las secciones más alejadas. El porcentaje de calado medido en estas secciones es mayor.

Las oscilaciones bruscas de velocidad se deben a los remolinos internos característicos del resalto hidráulico y con la existencia de aire en los mismos.

La Figura 9.5 representa los perfiles de velocidad del resalto hidráulico obtenido para un caudal de  $39 \text{ m}^3/\text{h}$  y número de Froude 7.55. Como se comentaba anteriormente, al ser este caudal el más pequeño de lo que se han analizado y requerir el equipo Doppler una distancia de 1 cm respecto a la solera para evitar rebotes, estos resultados son los que cuentan con el menor número de puntos muestreados.

La velocidad máxima se encuentra en la sección más cercana a la compuerta donde la disipación de energía provocada por el resalto es menor. Esta toma un valor de  $35.69 \text{ cm/s}$  y se produce para un calado del 8.67% respecto al calado total.

En el resto de las secciones la velocidad es menor debido a la disipación de energía que produce el resalto, llegando a estabilizarse en las últimas secciones del mismo.

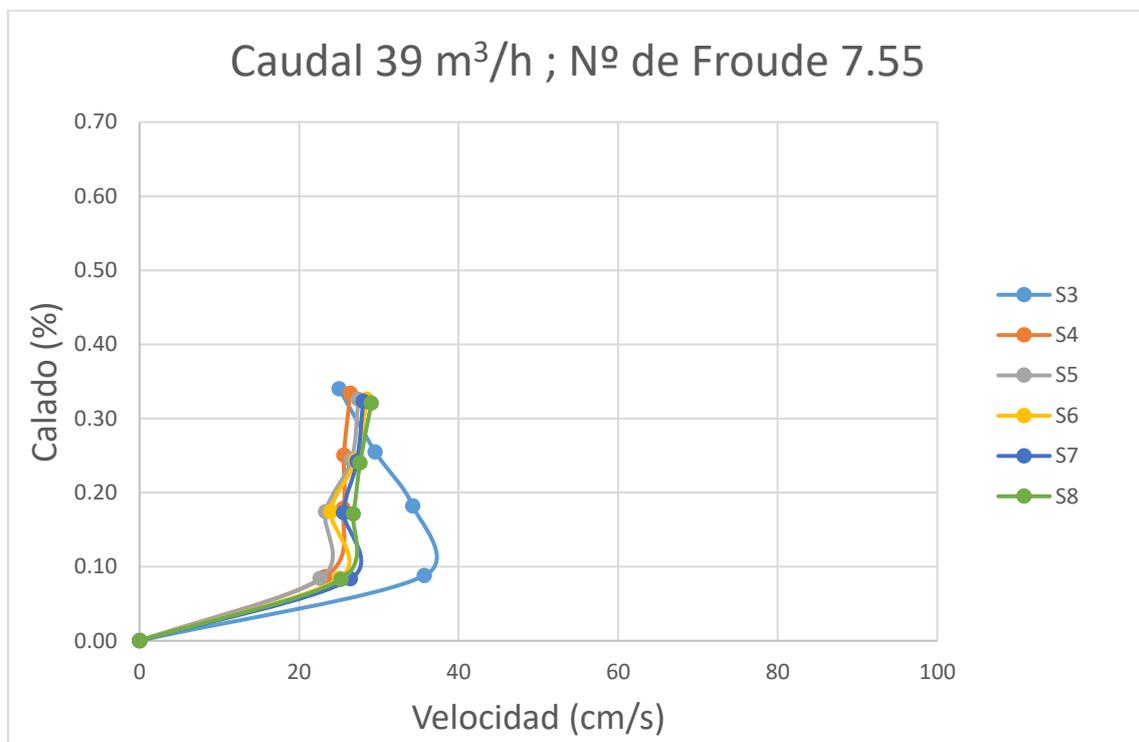


Figura 9. 5. Perfiles de velocidades para  $Q = 39 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $Fr = 7.55$ .

En la Figura 9.6 podemos ver los perfiles de velocidad obtenidos para una caudal de  $47,8 \text{ m}^3/\text{h}$  y un número de Froude 6.2. Al tratarse de un caudal superior al anterior, el calado en las secciones de análisis es mayor y el número de puntos muestreados también.

La velocidad máxima vuelve a presentarse en la sección más cercana a la compuerta con un valor de  $54,45 \text{ cm/s}$  para un porcentaje de calado del 8%. Para el resto de las secciones, la velocidad disminuye conforme nos alejamos de la compuerta debido a la disipación de energía que genera la existencia del resalto hidráulico.

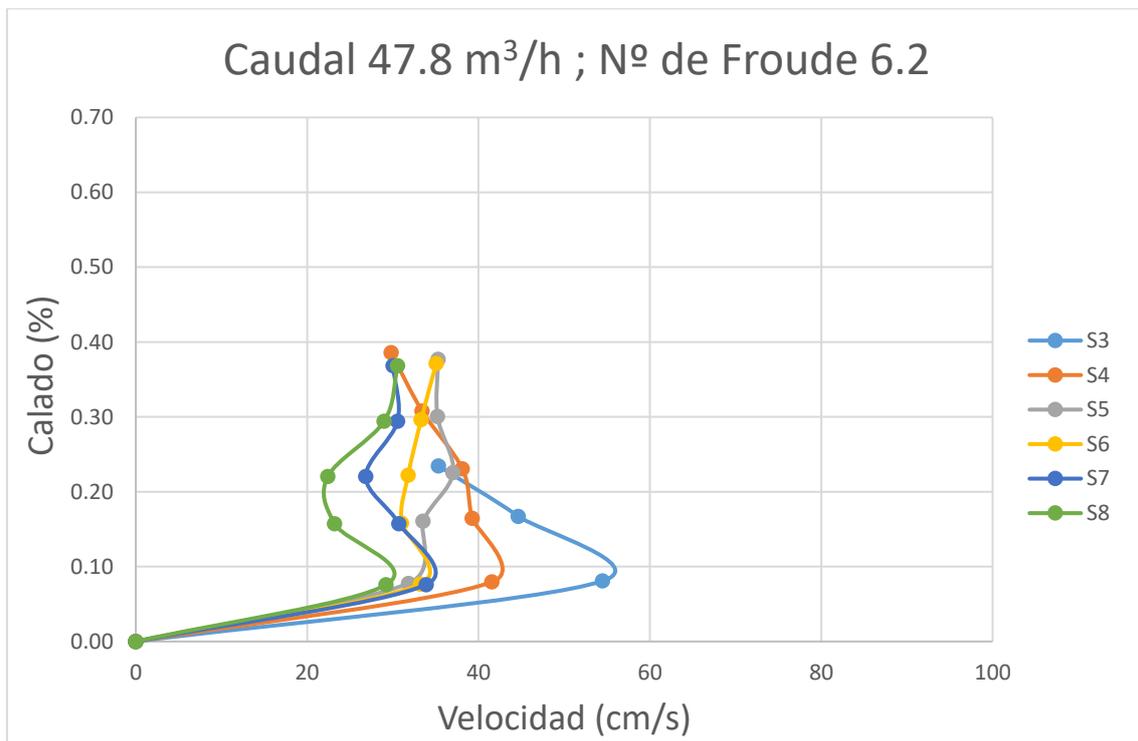


Figura 9. 6. Perfiles de velocidades para  $Q = 47.8 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $Fr = 6.2$

La figura 9.7 recoge los perfiles de velocidad del resalto hidráulico obtenido para una caudal de  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  y número de Froude 4.55.

Volvemos a ver velocidades menores en las últimas secciones del resalto donde la disipación de energía alcanza su máximo y la velocidad máxima de nuevo se presenta en la sección más cercana a la compuerta. Esta velocidad máxima toma un valor de  $70,59 \text{ cm/s}$  para un porcentaje de calado del 11%.

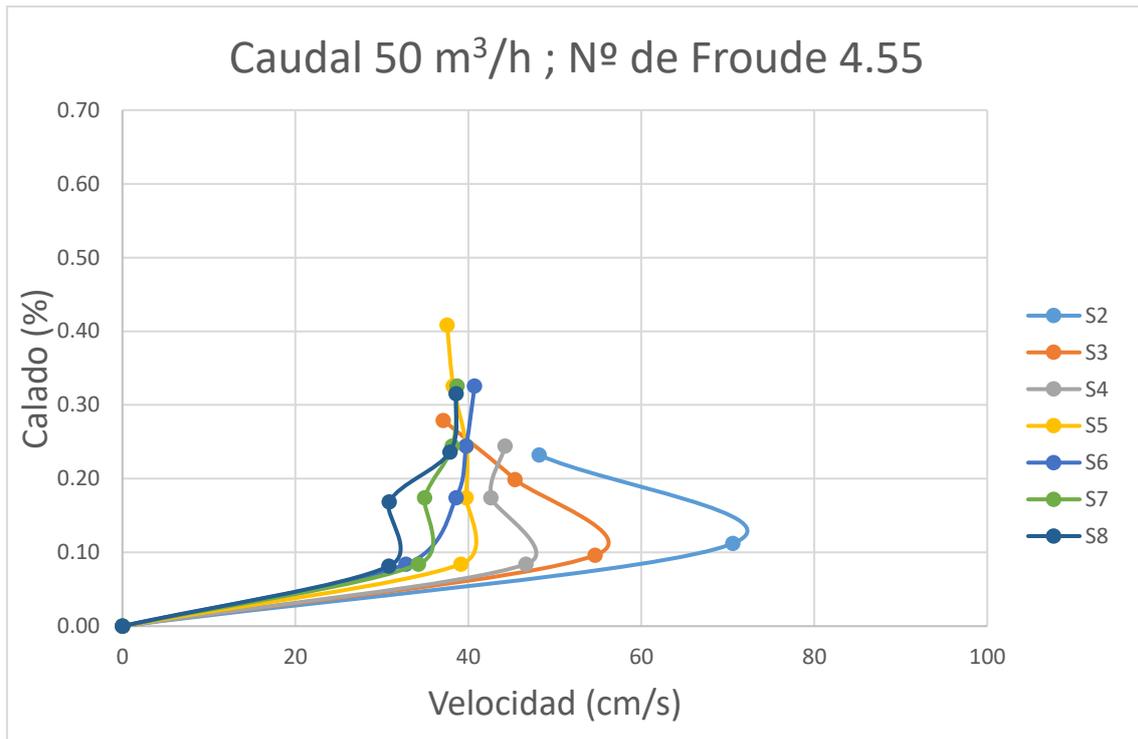


Figura 9. 7. Perfiles de velocidades para  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $Fr = 4.55$

La figura 9.8 muestra los perfiles de velocidad del resalto hidráulico obtenido para una caudal de 55 m<sup>3</sup>/h y número de Froude 5.18. A partir de este caudal, el calado de agua existente en las secciones de análisis ha permitido aumentar el número de punto de muestreo.

La velocidad máxima toma un valor de 77.79 cm/s y se presenta en el 8% del calado para la sección más cercana a la compuerta. El resto de secciones cuentan con velocidades cada vez menores debido a la disipación de energía que genera la existencia del resalto hidráulico.

Como se puede observar, en las últimas secciones del resalto la velocidad se estabiliza, lo que indica que la disipación de energía es reducida y que el resalto llega a su fin.

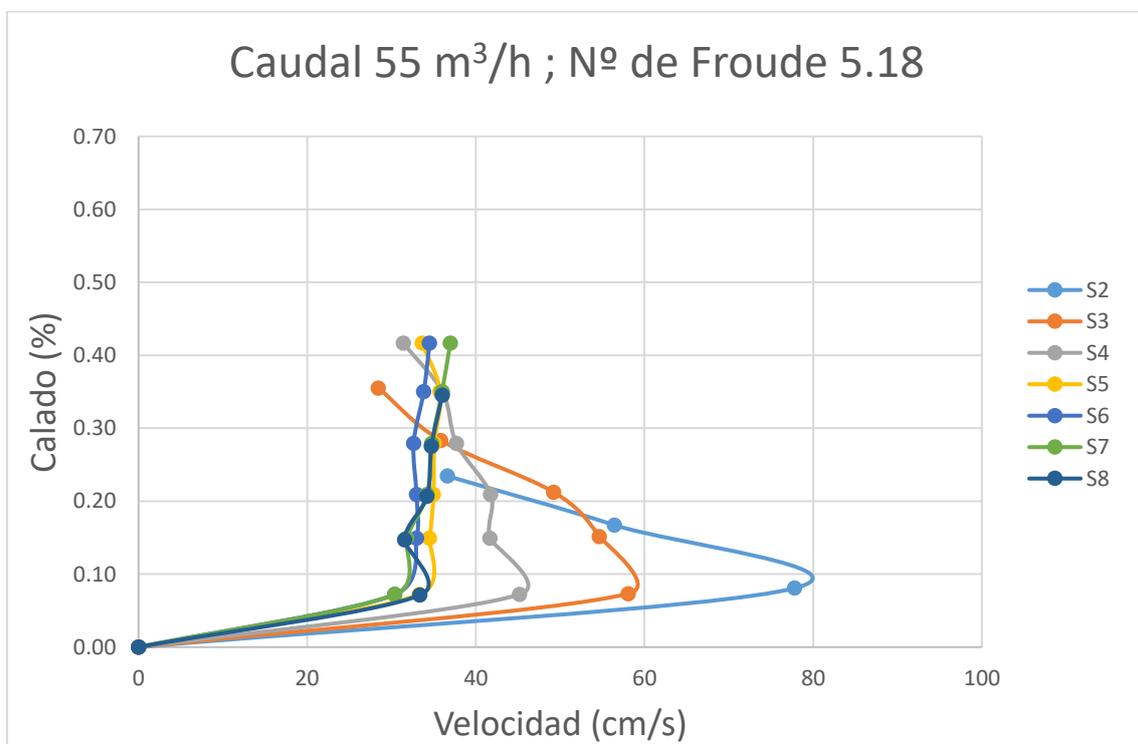


Figura 9. 8. Perfiles de velocidades para  $Q = 55 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $Fr = 5.18$

En la figura 9.9 se muestran los perfiles de velocidad del resalto hidráulico obtenido para una caudal de  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  y un número de Froude 4.35.

La velocidad máxima se presenta en la sección inicial del resalto y toma un valor de  $86.67 \text{ cm/s}$  para un porcentaje de calado del 16%. Para el resto de las secciones, como consecuencia de la disipación de energía, las velocidades son cada vez menores.

En las últimas secciones del resalto la velocidad alcanza un valor máximo en el que se mantiene constante durante toda la sección, esto indica que la disipación de energía que se está produciendo es muy reducida y que el resalto ha llegado a su fin.

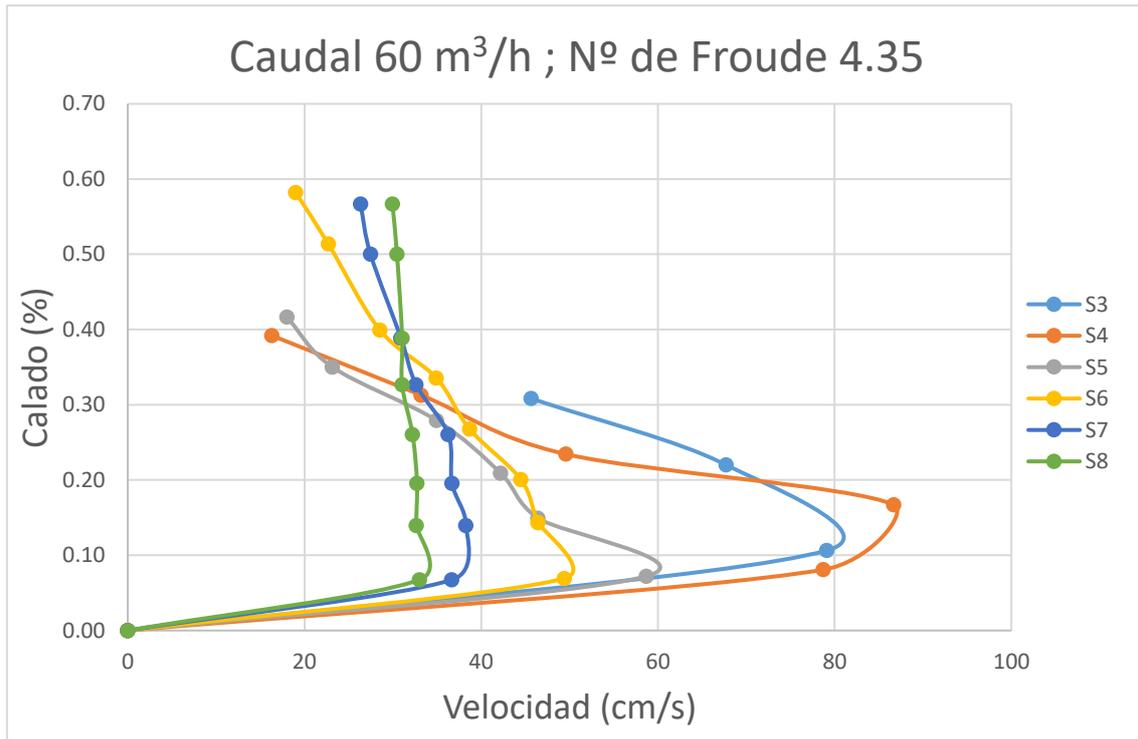


Figura 9. 9. Perfiles de velocidades para  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $Fr = 4.35$

En la figura 9.10 se recogen los perfiles de velocidad del resalto hidráulico obtenido para una caudal de  $67.4 \text{ m}^3/\text{h}$  y número de Froude 3.4. Este al ser el mayor de los caudales analizado, es el que cuenta con un mayor número de puntos de muestreo en todas las secciones medidas.

Para un porcentaje de calado del 20% se presenta la velocidad máxima, la cual toma un valor de  $71.80 \text{ cm/s}$ . Para el resto de las secciones, la velocidad va disminuyendo conforme nos alejamos de la compuerta, tomando un valor máximo en la última sección de  $30.56 \text{ cm/s}$  antes de estabilizarse.

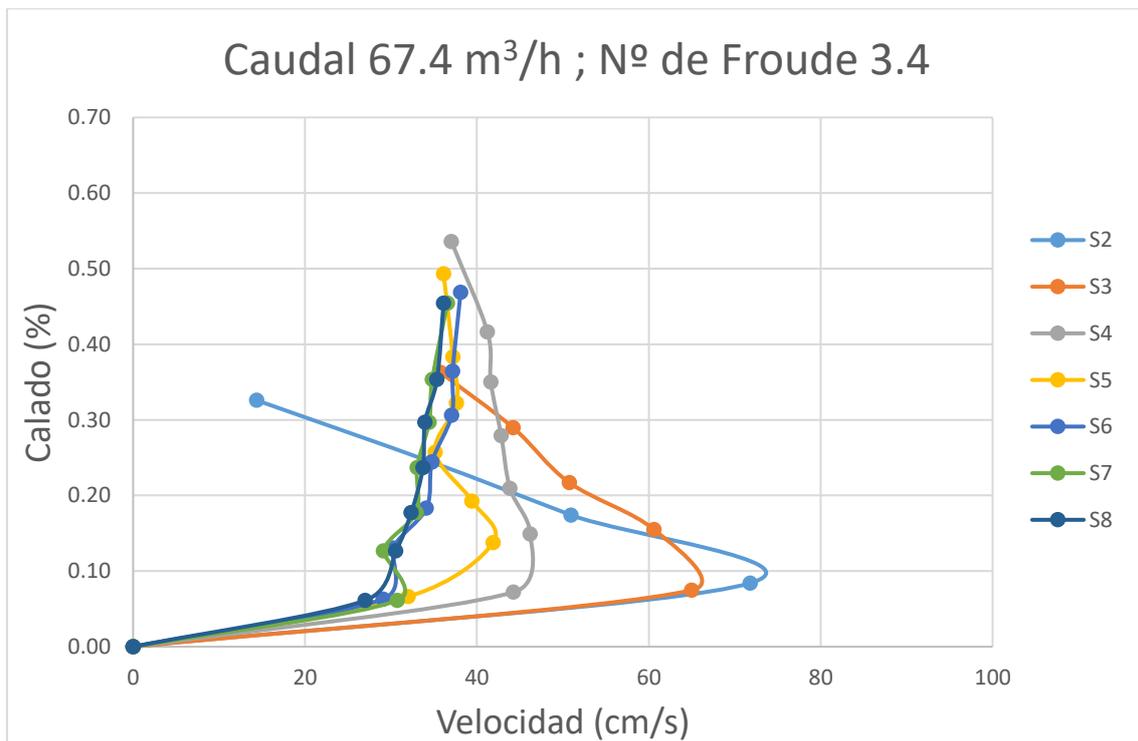


Figura 9. 10. Perfiles de velocidades para  $Q = 67.4 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $Fr = 3.4$

# 10 Resultados numéricos

En este apartado se analizan los resultados obtenidos tras la simulación numérica, mediante ANSYS, de un resalto hidráulico de caudal  $67.4 \text{ m}^3/\text{h}$  y número de Froude 5.73.

Se ha realizado la comparativa de tres tamaños de mallado (3,5 y 7 mm), dos modelos de turbulencia (K-épsilon y SST) y dos tipos de simulaciones (transitorio y permanente)

## 10.1 Longitud del resalto para un mallado de 3 mm, simulado en régimen permanente y transitorio con distintos modelos de turbulencia (comparativa resultados experimentales)

En este apartado vamos a analizar las longitudes de resalto obtenidas tras simular el modelo con un mallado de 3 mm en régimen permanente/transitorio y con distintos modelos de turbulencia. Cabe destacar que, para la comparación de la longitud de resalto y lámina libre, se ha tomado como referencia el mallado más fino (3 mm), teóricamente más preciso.

El criterio para definir el final del resalto ha sido el mismo que el utilizado en laboratorio. Dado que en laboratorio se consideró que el final del resalto se producía cuando los remolinos desaparecían, aquí se ha considera que el final del resalto se produce cuando la fracción de agua toma el valor 1 en toda la sección, siendo la fracción de aire cero.

En la Figura 10.1, se muestra el resalto obtenido tras simular el modelo con un mallado de 3 mm en régimen permanente y con un modelo de turbulencia K-Épsilon. Las dos secciones marcadas, se corresponden con la sección inicial y final del resalto, por lo que la longitud del mismo es la distancia comprendida entre ambas secciones.

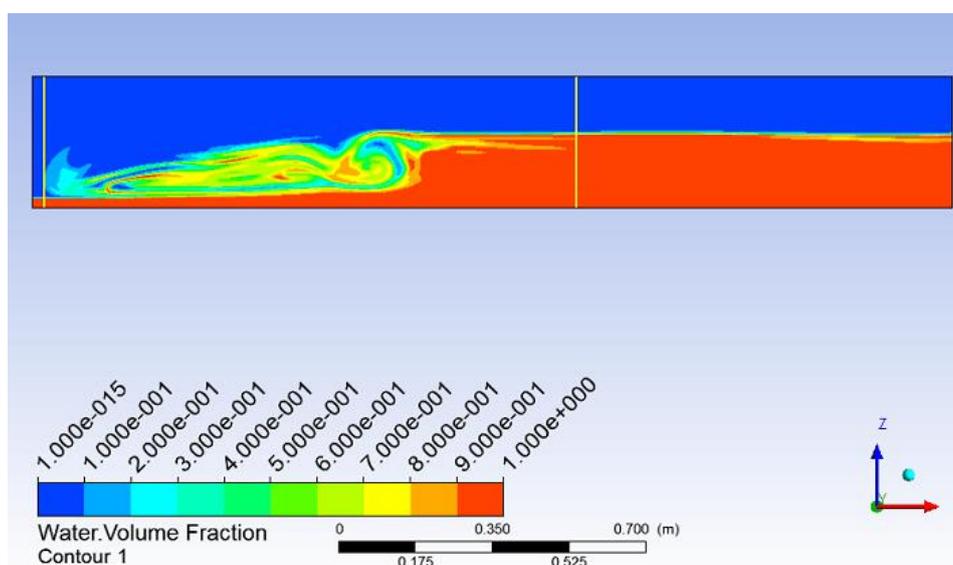


Figura 10. 1. Longitud de resalto obtenida en régimen permanente y con modelo de turbulencia K-Épsilon

Considerando que el canal se encuentra en el punto (0,0,0), la longitud del resalto es la siguiente (Tabla 10.1):

<b>Posición sección inicial</b>		<b>Posición sección final</b>	
<b>x (m)</b>	0,028	<b>x (m)</b>	1,24
<b>y<sub>1</sub> (m)</b>	0,025	<b>y<sub>1</sub> (m)</b>	0,17
<b>Longitud de resalto (m)</b>		1,21	

Tabla 10. 1. Longitud de resalto obtenida en régimen permanente y con modelo de turbulencia K-Épsilon

En la Figura 10.2, se muestra los resultados obtenidos tras simular el modelo en régimen permanente, pero con un modelo de turbulencia Shear Stress Transport. Las dos secciones marcadas, se corresponden con la sección inicial y final del resalto, por lo que la longitud del mismo es la distancia comprendida entre ambas secciones.

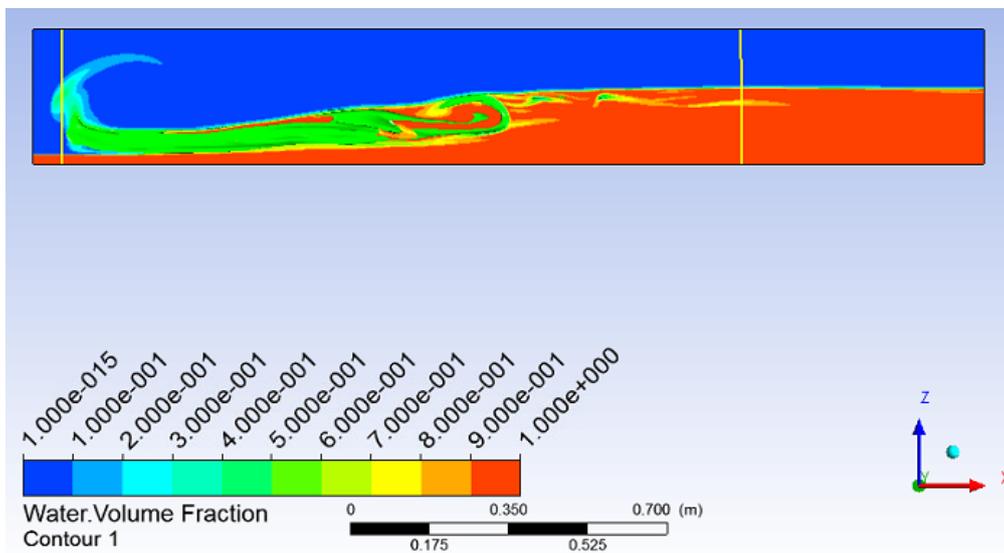


Figura 10. 2. Longitud de resalto obtenida en régimen permanente y con modelo de turbulencia SST

Considerando que el canal se encuentra en el punto (0,0,0), la longitud del resalto es la siguiente (Tabla 10.2):

<b>Posición sección inicial</b>		<b>Posición sección final</b>	
<b>x (m)</b>	0,06	<b>x (m)</b>	1,36
<b>y<sub>1</sub> (m)</b>	0,025	<b>y<sub>1</sub> (m)</b>	0,17
<b>Longitud de resalto (m)</b>		1,3	

Tabla 10. 2. Longitud de resalto obtenida en régimen permanente y con modelo de turbulencia SST

En la Figura 10.3, se muestra los resultados obtenidos tras simular el modelo en régimen transitorio con un modelo de turbulencia K-Épsilon. Al igual que en los dos casos anteriores, las dos secciones marcadas se corresponden con la sección inicial y final del resalto, por lo que la longitud del mismo es la distancia comprendida entre ambas secciones.

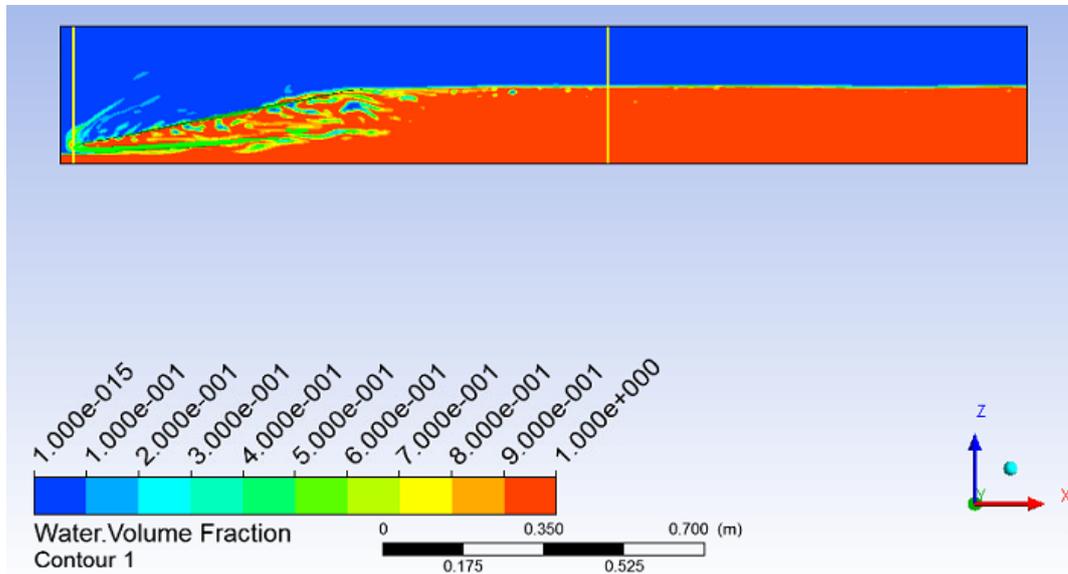


Figura 10. 3. Longitud de resalto obtenida en régimen transitorio y con modelo de turbulencia (K-Épsilon)

Considerando que el canal se encuentra en el punto (0,0,0), la longitud del resalto es la siguiente (Tabla 10.3):

<b>Posición sección inicial</b>		<b>Posición sección final</b>	
<b>x (m)</b>	0,027	<b>x (m)</b>	1,49
<b>y<sub>1</sub> (m)</b>	0,021	<b>y<sub>1</sub> (m)</b>	0,17
<b>Velocidad (m/s)</b>	2,64	<b>Velocidad (m/s)</b>	0,32
<b>Longitud de resalto (m)</b>		1,16	

Tabla 10. 3. Longitud de resalto obtenida en régimen transitorio y con modelo de turbulencia (K-Épsilon)

La longitud de resalto obtenida en el laboratorio ha sido la siguiente, en esta ocasión se ha tomado como origen del eje de coordenadas la compuerta plana:

<b>Posición sección inicial</b>		<b>Posición sección final</b>	
<b>x (m)</b>	0,09	<b>x (m)</b>	1,29
<b>y<sub>1</sub> (m)</b>	0,028	<b>y<sub>1</sub> (m)</b>	0,165
<b>Longitud de resalto (m)</b>		1,2	

Tabla 10. 4. Longitud de resalto obtenida en laboratorio

El hecho de que la longitud de resalto sea menor en laboratorio que en los regímenes permanentes, puede deberse a que en laboratorio la disipación de energía sea mayor, llegando antes el resalto a su final. Sin embargo, vemos que la variación con el modelo simulado en régimen transitorio es mucho menor, esto puede deberse a que un régimen transitorio es más aproximado a las condiciones reales.

## 10.2 Lámina libre para un mallado de 3 mm, simulado en régimen permanente y transitorio con distintos modelos de turbulencia (comparativa resultados experimentales)

En este apartado se muestran los datos obtenidos para la lámina libre (Figura 10.4). Siguiendo el patrón de los apartados anteriores, realizaremos una comparativa entre los datos obtenidos para el mallado de 3 mm y los diferentes regímenes en lo que se ha simulado el modelo y los datos del laboratorio.

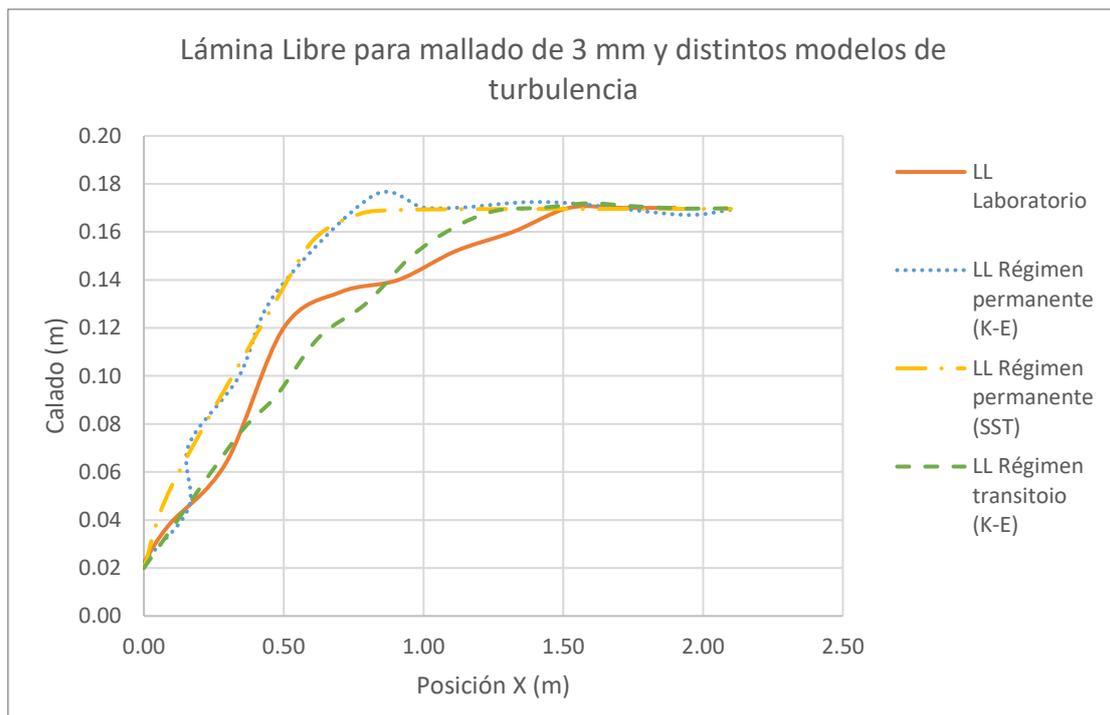


Figura 10. 4. Lámina Libre Laboratorio

Como se puede observar, el calado supercrítico toma un valor de 0,0225 m para el régimen permanente y transitorio, bien sean datos procedentes de la simulación numérica o datos medidos en laboratorio. Esto se debe a que el valor medido en laboratorio ha sido empleado como condición de contorno en la simulación numérica, es decir, este valor ha sido establecido por nosotros como una de las condiciones iniciales; lo mismo ocurre con el calado subcrítico que toma un valor de 0.17 m.

Por otro lado, vemos que la lámina libre procedente de la simulación en régimen transitorio es la que más se acerca a la obtenida en laboratorio. Esto tiene sentido, pues el flujo que existía en laboratorio era cambiante en el tiempo, es decir era un régimen transitorio. Por el contrario, los modelos simulados en régimen permanente se alejan más de los resultados de laboratorio, pero son muy próximos entre ellos, a pesar de la elección del modelo de turbulencia.

## 10.3 Secciones teóricas del resalto hidráulico para un mismo método de simulación y distintos tamaños de mallado

En primer lugar, se van a exponer los resultados obtenidos para cada una de las 8 secciones teóricas en las que hemos dividido el resalto hidráulico y los distintos regímenes y modelos de turbulencia en los que se ha simulado el modelo, centrando el análisis en la influencia del tamaño del mallado (3, 5 o 7 mm).

### 10.3.1 Régimen permanente y modelo de turbulencia K- $\epsilon$

Los resultados que se muestran a continuación son los obtenidos tras simular el modelo numérico en un régimen permanente y con el modelo de turbulencia K-  $\epsilon$ .

En la Figura 10.5 se muestran los resultados obtenidos para la segunda sección teórica del resalto hidráulico. Se observa una velocidad máxima de 2,5 m/s para el mallado de 3 y 5 mm para un calado de 0,01 m. Por su parte, para un mallado de 7 mm, la velocidad máxima es 2,14 m/s para un calado de 0,01 m.

La diferencia entre el mallado de 3 y 5 mm es reducida, esto nos indica que por un lado que la secciones se encuentran ubicadas en el mismo punto del resalto y, por otro, que ya se ha alcanzado un tamaño de celda lo suficiente pequeño para que el modelo se estabilice.

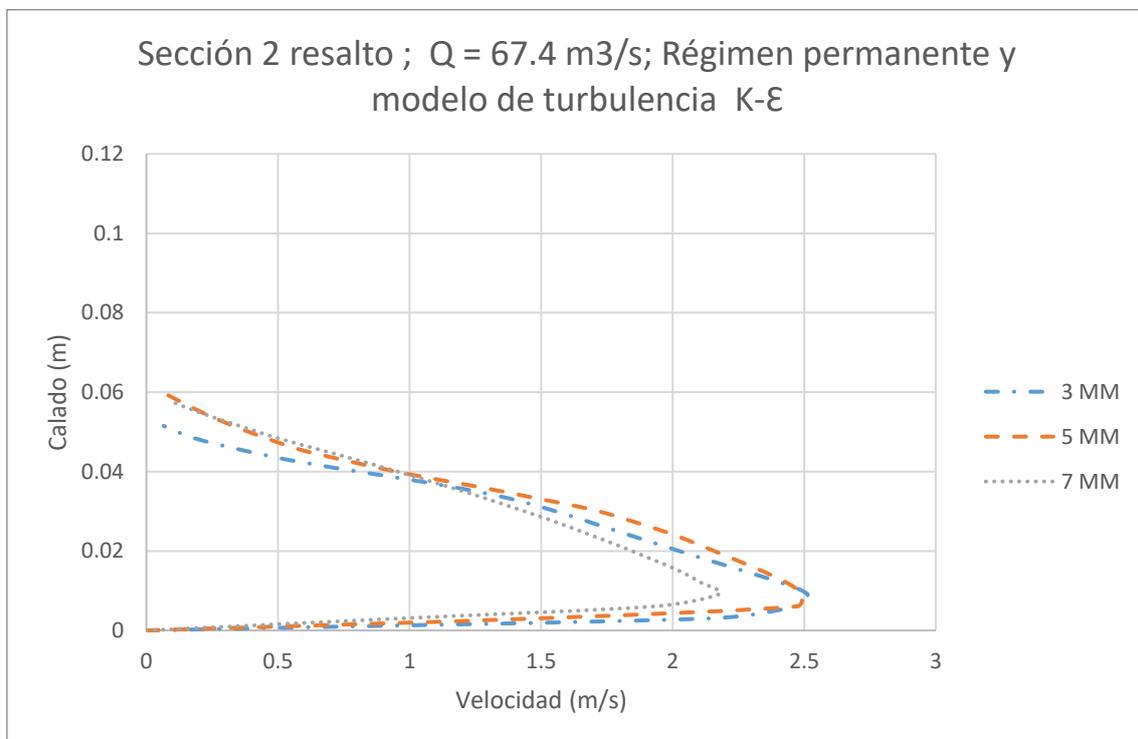


Figura 10. 5. Resultados para sección 2 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia K-  $\epsilon$

En la Figura 10.6 se muestran los resultados obtenidos para la tercera sección teórica del resalto hidráulico. La velocidad máxima toma un valor 2,16 m/s para el mallado de 3 mm y de 2,17 m/s para el mallado de 5 mm, ambos para un calado de 0,01 m. Por su parte, para un mallado de 7 mm, la velocidad máxima es 1.95 m/s también para un calado de 0,01 m.

Vuelven a ser muy reducidas las diferencias entre los dos mallados más pequeños, lo que nos vuelve a confirmar que la elección de un mallado de 3 mm sería la correcta, pues los resultados se han estabilizado.

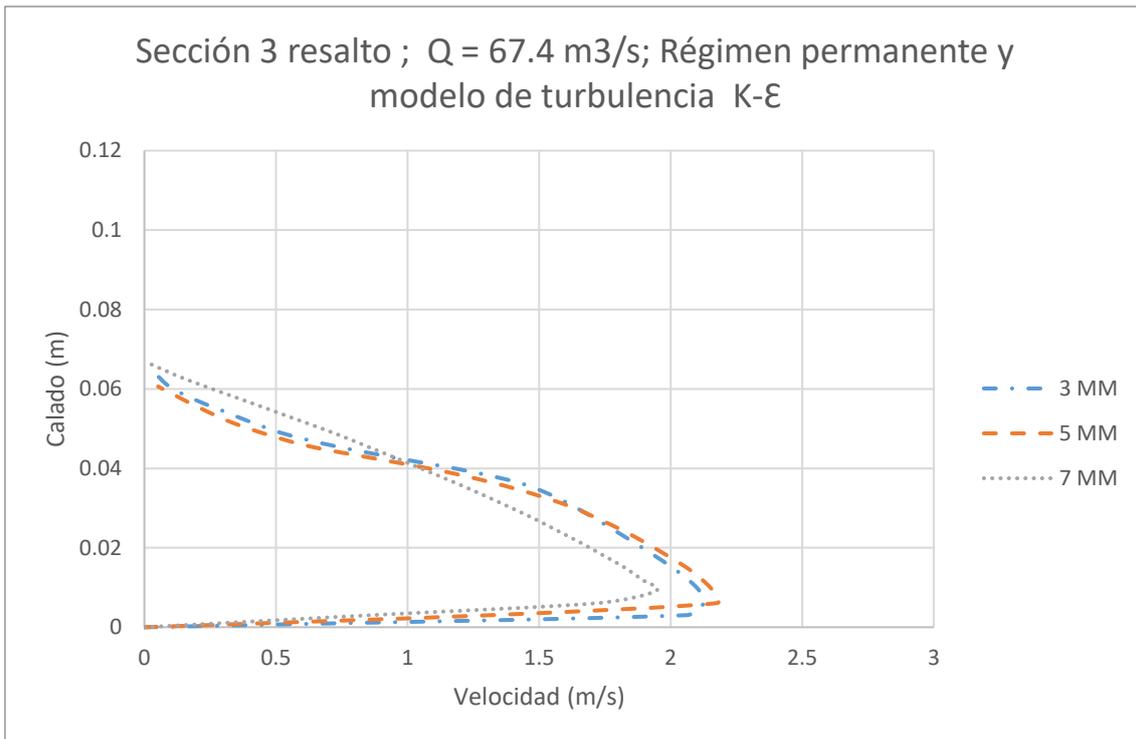


Figura 10. 6. Resultados para sección 3 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia K-  $\epsilon$

En la Figura 10.7 se muestran los resultados obtenidos para la cuarta sección teórica del resalto hidráulico. En esta sección, es para el calado de 0,01 m para el que se produce la velocidad máxima, tomando un valor de 1,7 m/s para el mallado de 3 y 5 mm. Por su parte, para un mallado de 7 mm, la velocidad máxima es 1.95 m/s también para un calado de 0,01 m.

Las diferencias entre el mallado de 3 mm y el de 5 mm continúan siendo muy reducidas.

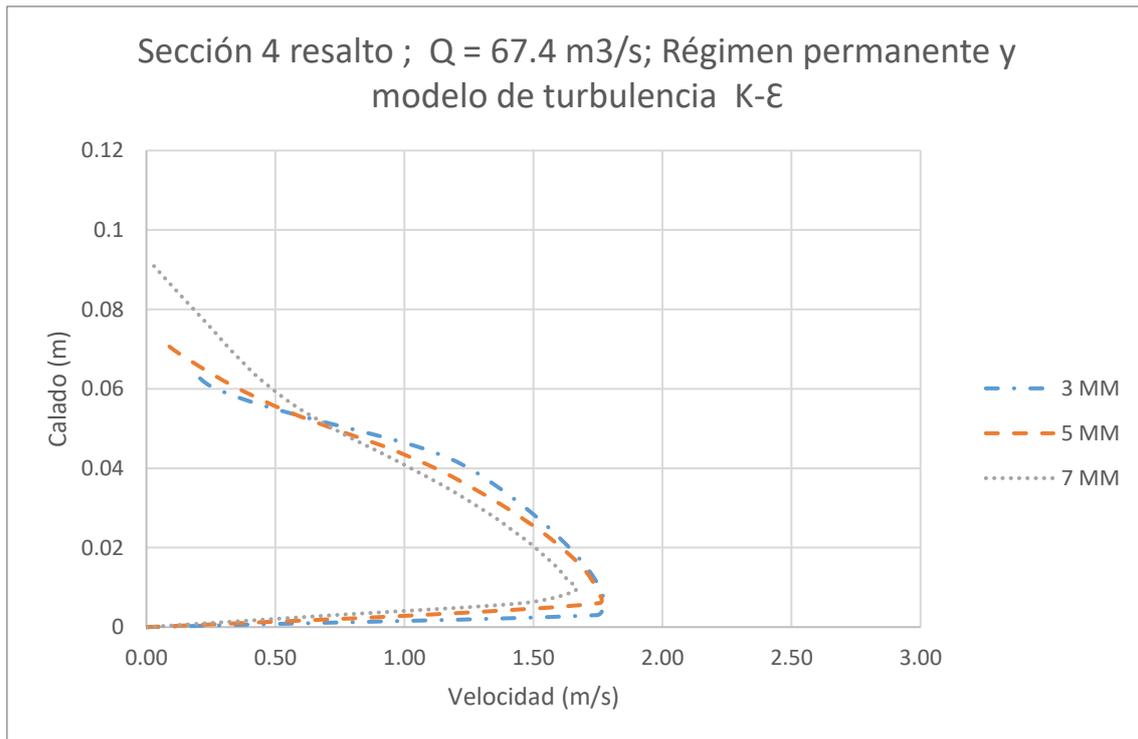


Figura 10. 7. Resultados para sección 4 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia K- $\epsilon$

En la Figura 10.8 se muestran los resultados obtenidos para la quinta sección teórica del resalto hidráulico. La velocidad máxima es 1,5 m/s para el mallado de 3 y de 1,4 m/s para el mallado de 5 mm y de 7 mm, las tres velocidades máximas de se dan en un calado de 0,01 m.

En esta ocasión, se observa que las diferencias entre los dos mallado más pequeños son notables. Esto se puede deber a que ambas secciones no se encuentran situadas en el mismo punto de resalto, siendo la situación de la sección en el mallado de tres mm más cercana a la compuerta (mayor velocidad).

Por otro lado, hay que destacar que las velocidades alcanzada en esta sección son menores que las alcanzadas en las anteriores, lo que es debido a la disipación de energía que genera el propio resalto.

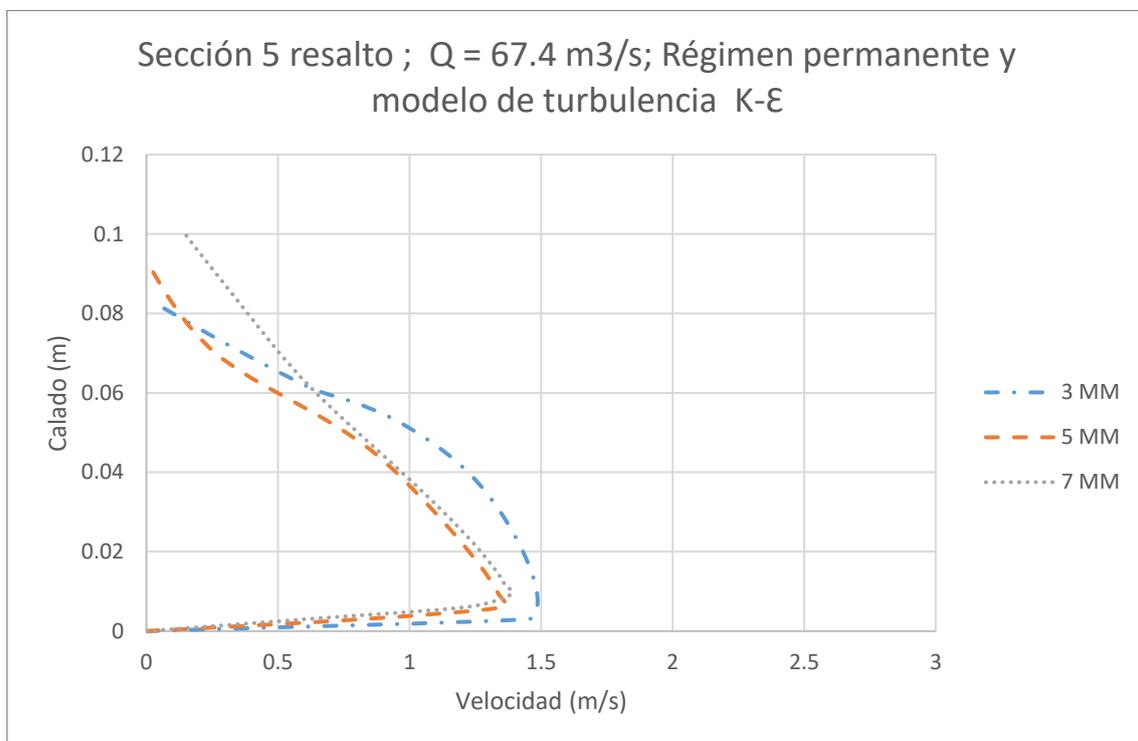


Figura 10. 8. Resultados para sección 5 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia K- $\epsilon$

En la Figura 10.9 se muestran los resultados obtenidos para la sexta sección teórica del resalto hidráulico. Se vuelve a alcanzar para un calado de 0,01 m la velocidad máxima, siendo de 0,9 m/s para los mallados de 3 y de 5 mm. La velocidad máxima para el mallado de 7 mm es de 1,1 m/s se produce en un calado de 0,011m.

Vemos que las diferencias entre los dos mallados con menor tamaño de celda vuelven a ser despreciables. Sin embargo, para el mallado de 7 mm sí existen diferencias notables, siendo mayor la velocidad máxima. Esto puede deberse tanto al tamaño de celda más gran, lo que reduce la precisión del modelo, como a un adelantamiento de la sección respecto al inicio del resalto.

Al igual que ocurría en la sección anterior, la velocidad continúa disminuyendo debido a la disipación de energía.

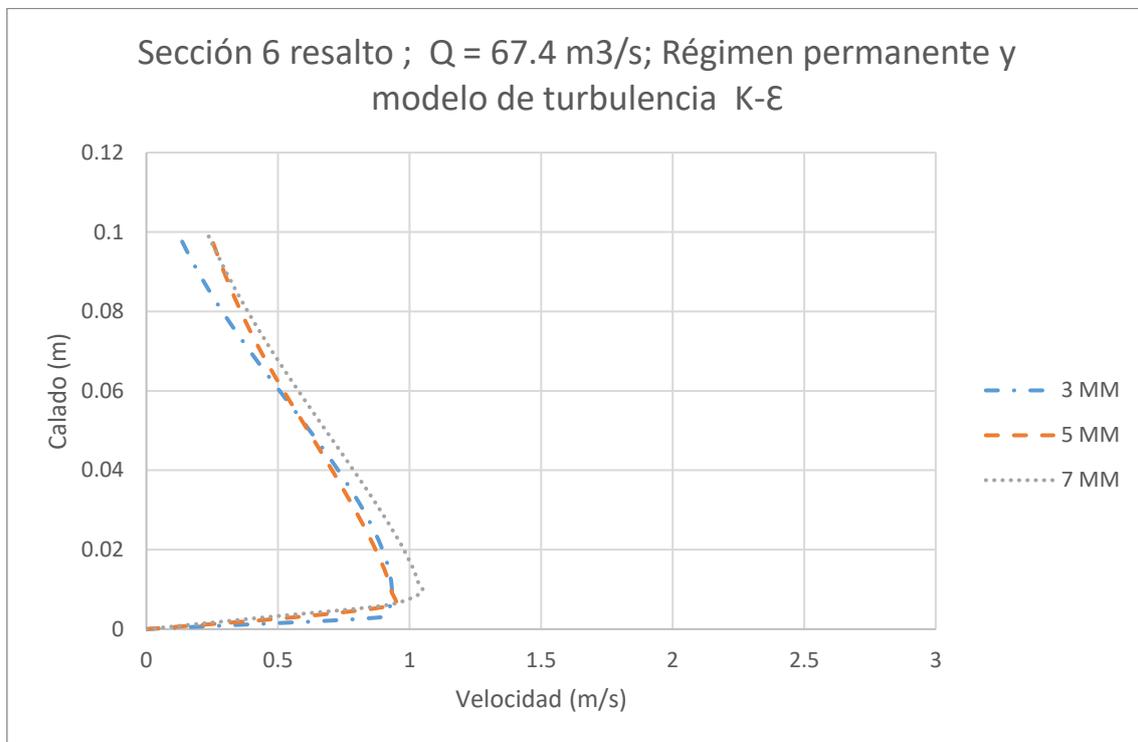


Figura 10. 9. Resultados para sección 6 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia K-ε

Los resultados obtenidos para la séptima sección teórica del resalto hidráulico se muestran en la Figura 10.10. La velocidad máxima para el mallado de 7 mm es 0,75 m/s y el calado en el que se produce es 0,011 m. Mientras que, en esta sección, la velocidad máxima es 0,65 m/s para los mallados de 3 y de 5 mm y se produce en un calado de 0,008 m

Para el mallado de 7 mm vuelve a existir diferencias a considerar. La velocidad continúa disminuyendo debido a la disipación de energía.

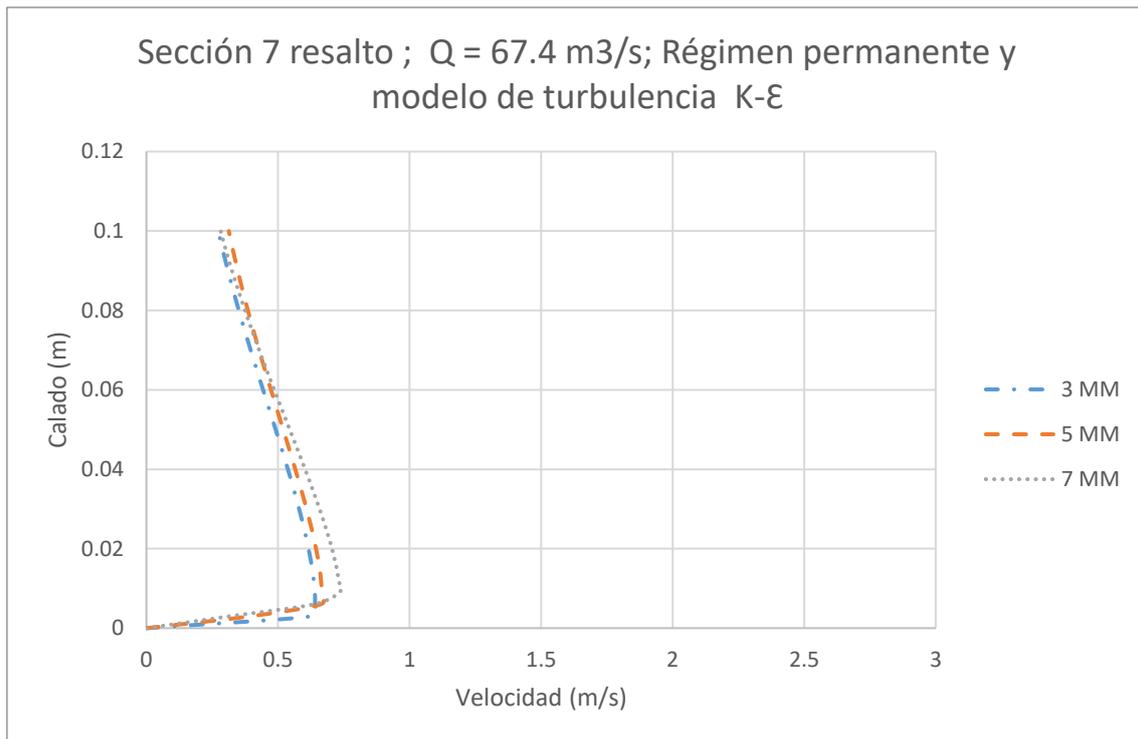


Figura 10. 10. Resultados para sección 7 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia K- $\epsilon$

En la Figura 10.11 se muestran los resultados obtenidos para la octava sección teórica del resalto hidráulico. Se observa una velocidad máxima de 0,52 m/s para el mallado de 3 y un calado de 0,002 m. La velocidad máxima para el mallado de 5 y 7 mm es de 0,55 m/s para un calado de 0,09 m.

Vemos que las diferencias entre los tres mallados son despreciables, siendo ligeramente mayores las diferencias con el mallado de 7 mm. Esto se debe a que, en esta ocasión, las secciones han sido ubicadas en el mismo punto del resalto.

En cuanto a la disipación de energía, esta alcanza su máximo en esta última sección, es por esto que la velocidad máxima en esta sección es la menor de todas las analizadas.

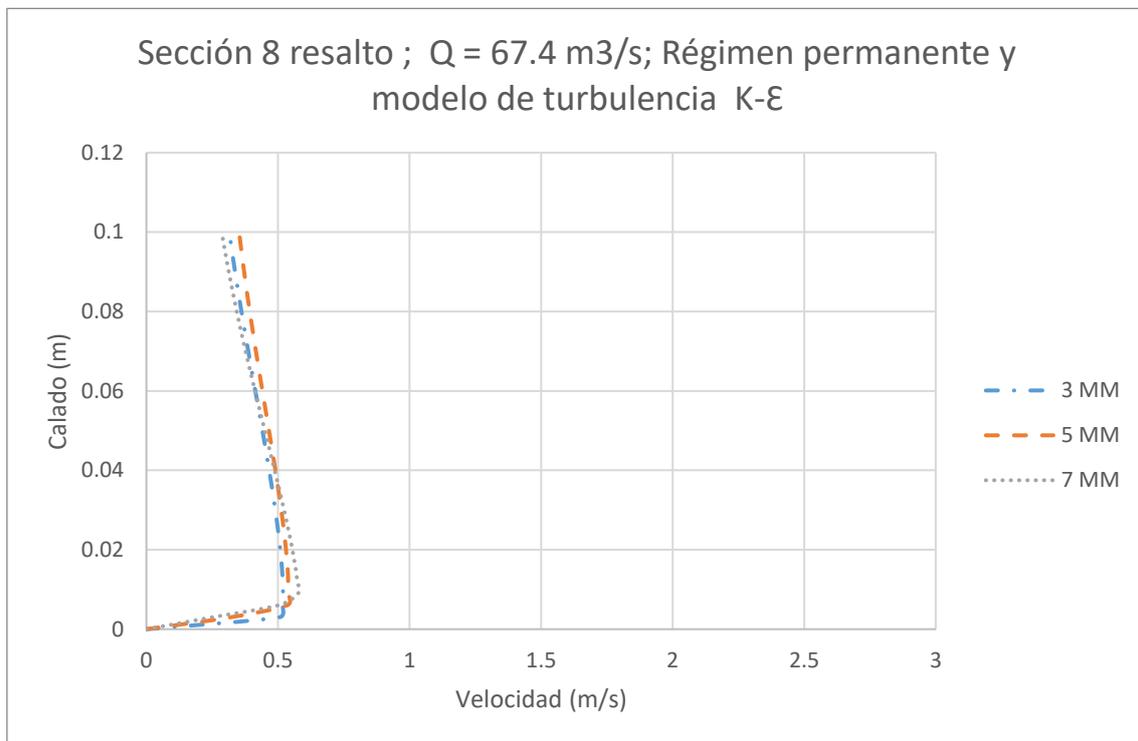


Figura 10. 11. Resultados para sección 8 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia K- $\epsilon$

### 10.3.2 Régimen permanente y modelo de turbulencia Shear Stress Transport

En este apartado se muestran los perfiles de velocidad, existentes en las ocho secciones teóricas en las que hemos dividido el resalto hidráulico, tras simular el modelo creado en un régimen permanente con un modelo de turbulencia Shear Stress Transport.

El caudal de estudio es  $67,4 \text{ m}^3/\text{s}$  y el número de Froude 5,73.

En la Figura 10.12 se muestran los resultados obtenidos para la segunda sección teórica del resalto hidráulico para un régimen permanente y un modelo de turbulencia SST. Al tratarse de nuevo de un régimen permanente, los resultados no varían excesivamente respecto al modelo anterior.

Volvemos a ver diferencias menores entre los dos tamaños de celda más pequeños (3 y 5 mm). La velocidad máxima se presenta en los tres modelos para un calado de 0,01 m, tomando valores de 2,53 m/s, 2,43 m/s y 2,17 m/s, respectivamente.

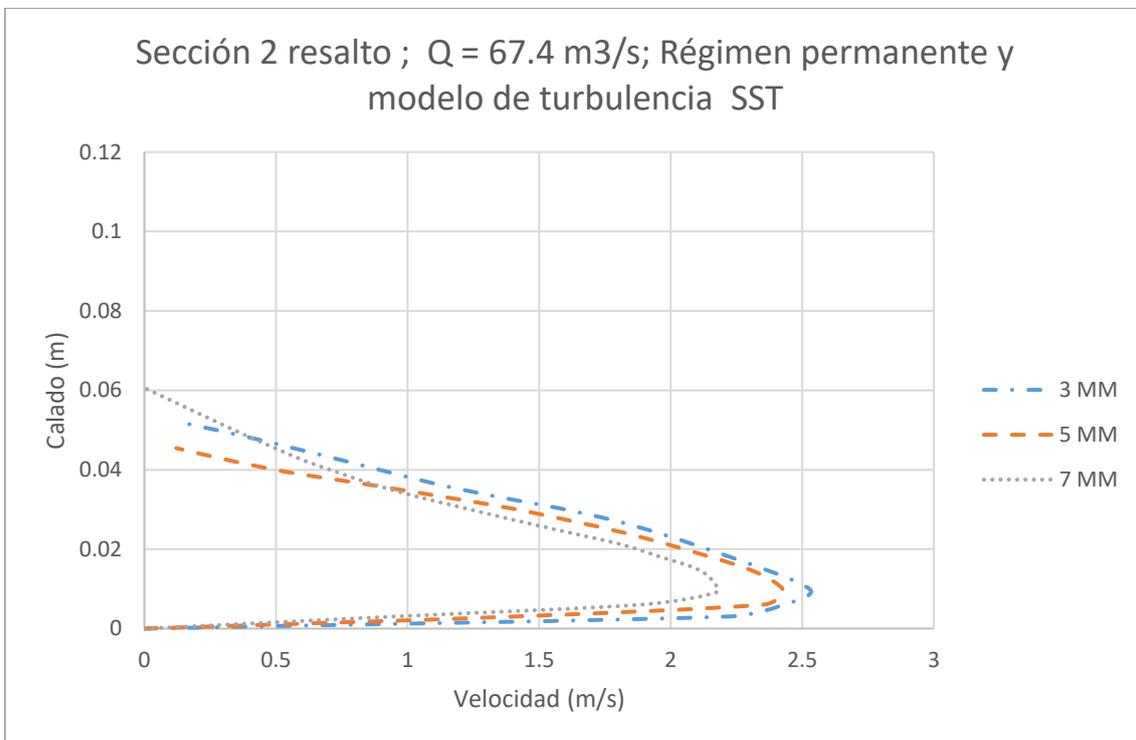


Figura 10. 12. Resultados para sección 2 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia SST

La Figura 10.13 muestra los resultados obtenidos para la tercera sección teórica del resalto hidráulico. El comportamiento que se observa en esta sección es similar al explicado anteriormente, diferencias despreciables para los mallados de 3 y 5 mm y una mayor desviación para un mallado de 7 mm.

La velocidad máxima alcanzada es de 2,1 m/s para un calado de 0,006 en el caso de los dos mallados más pequeños y de 1,7 m/s para un calado de 0,01 m para un mallado de 7 mm.

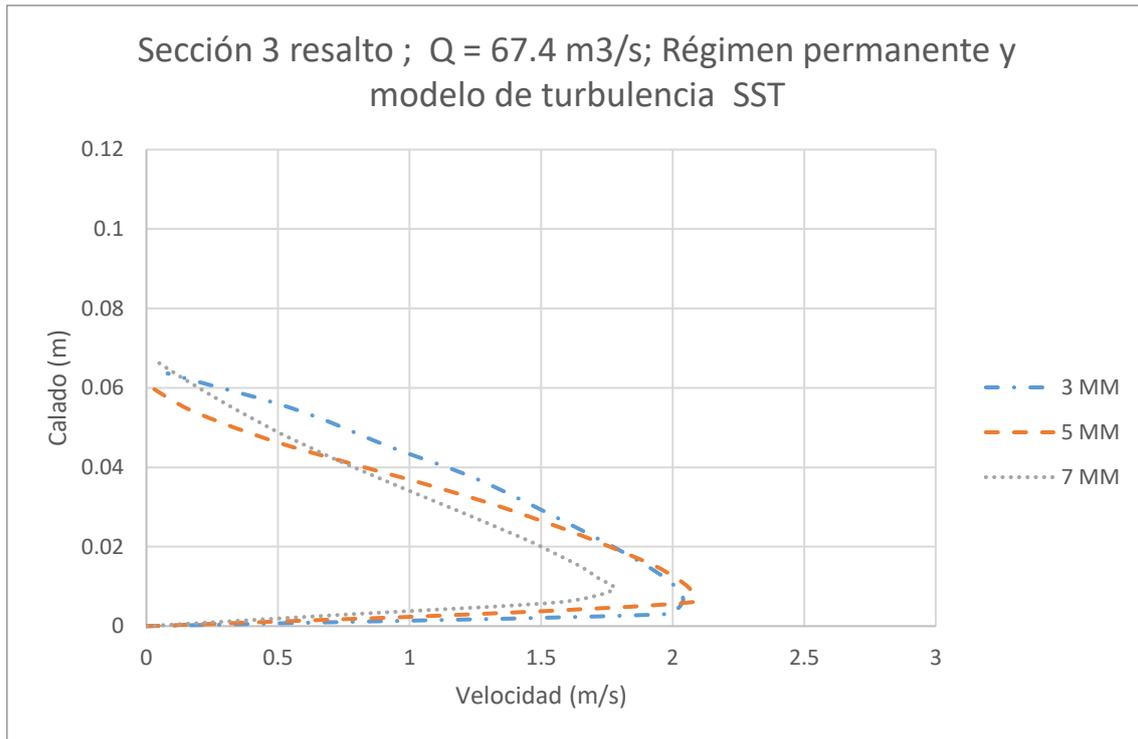


Figura 10. 13. Resultados para sección 3 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia SST

En la Figura 10.14 se muestran los resultados obtenidos para la cuarta sección teórica del resalto hidráulico. Se observa una velocidad máxima de 1,6 m/s para el mallado de 3 mm y de 1,8 m/s para el mallado de 5 mm. Para el mallado de 7 mm, el valor máximo es de 1,5 m/s.

En esta ocasión, se observa que las diferencias entre los dos mallado más pequeños es relevante. Esto puede deberse a que ambas secciones no se encuentran situadas en el mismo punto de resalto, siendo la situación de la sección en el mallado de 5 mm más cercana a la compuerta (mayor velocidad).

Por otro lado, destacar que las velocidades alcanzada en esta sección son menores que las alcanzadas en las anteriores, debido a la disipación de energía que genera el propio resalto.

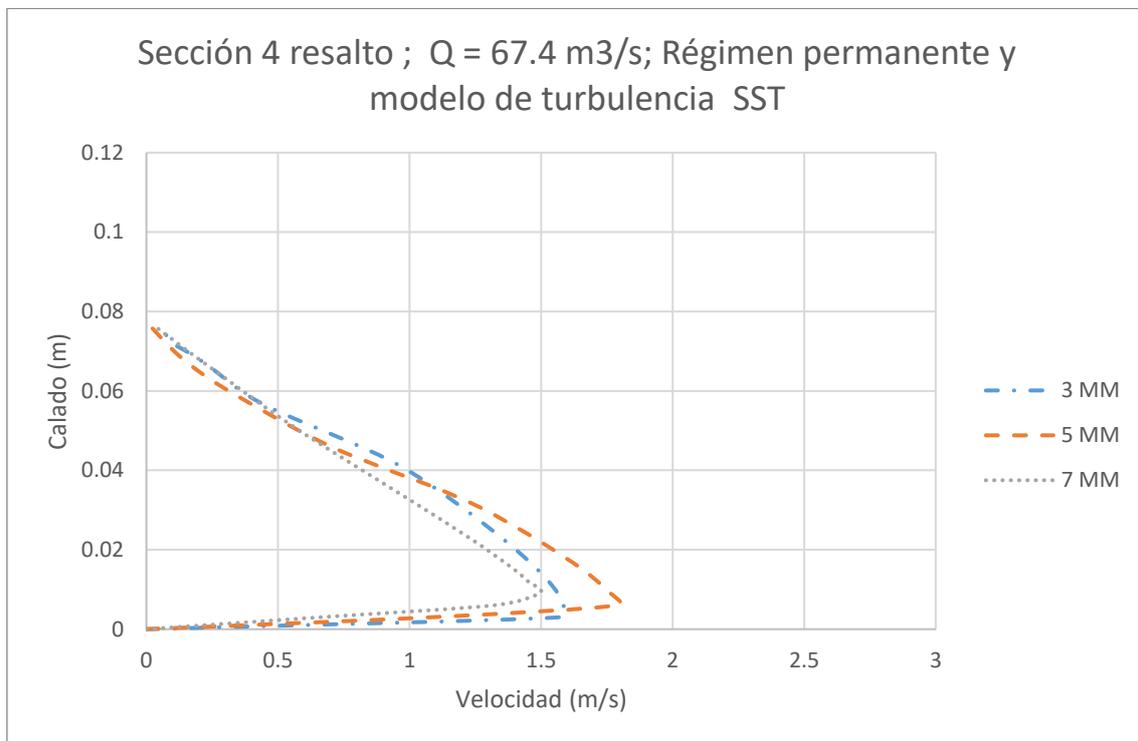


Figura 10. 14. Resultados para sección 4 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia SST

En la Figura 10.15 podemos ver los resultados obtenidos para la quinta sección teórica del resalto hidráulico. Para el mallado de con un ancho de celda de 3 mm, la velocidad máxima es 1,45 m/s, siendo 1,50 m/s para el mallado de 5 mm. Por último, para el mallado de 7 mm, el valor máximo es de 1,45 m/s. Las tres velocidades máximas se producen entre un calado de 0,009 y 0,01 m.

En esta ocasión, al igual que ocurría con la sección anterior, se observa que las diferencias entre los dos mallado más pequeños esa considerar. El origen de esta diferencia puede ser que ambas secciones no estén situadas en el mismo punto de resalto, siendo la ubicación de la sección en el mallado de 5 mm más cercana a la compuerta (mayor velocidad) o a que la disipación para el mallado de 5 mm es menor.

La velocidad máxima de esta sección continúa siendo menor que a velocidad máxima alcanzada en las secciones anteriores, lo que evidencia que se continúa disipando energía.

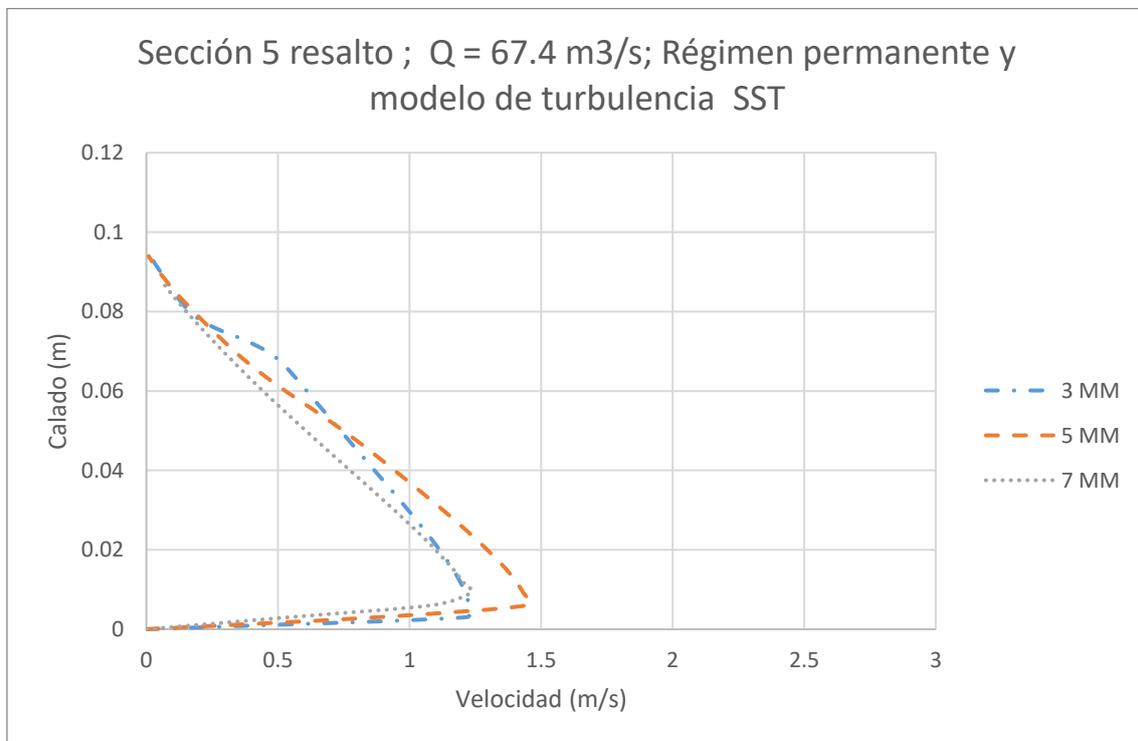


Figura 10. 15. Resultados para sección 5 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia SST

En la Figura 10.16 recoge los resultados obtenidos para la sexta sección teórica del resalto hidráulico. El valor de la velocidad máxima para el mayor mallado es 0,8 m/s. Por su parte, la velocidad máxima para el mallado de 3 mm es 0,83 m/s y para el mallado de 5 mm es 1,07 m/s.

De nuevo, al igual que ocurría con la sección anterior, la diferencia entre los dos mallado más pequeños se debe a que ambas secciones no se encuentran situadas en el mismo punto de resalto, estando más adelantada en el mallado de 5 mm.

Por otro lado, vemos que las velocidades continúan disminuyendo, pues en esta sección el resalto continúa disipando energía.

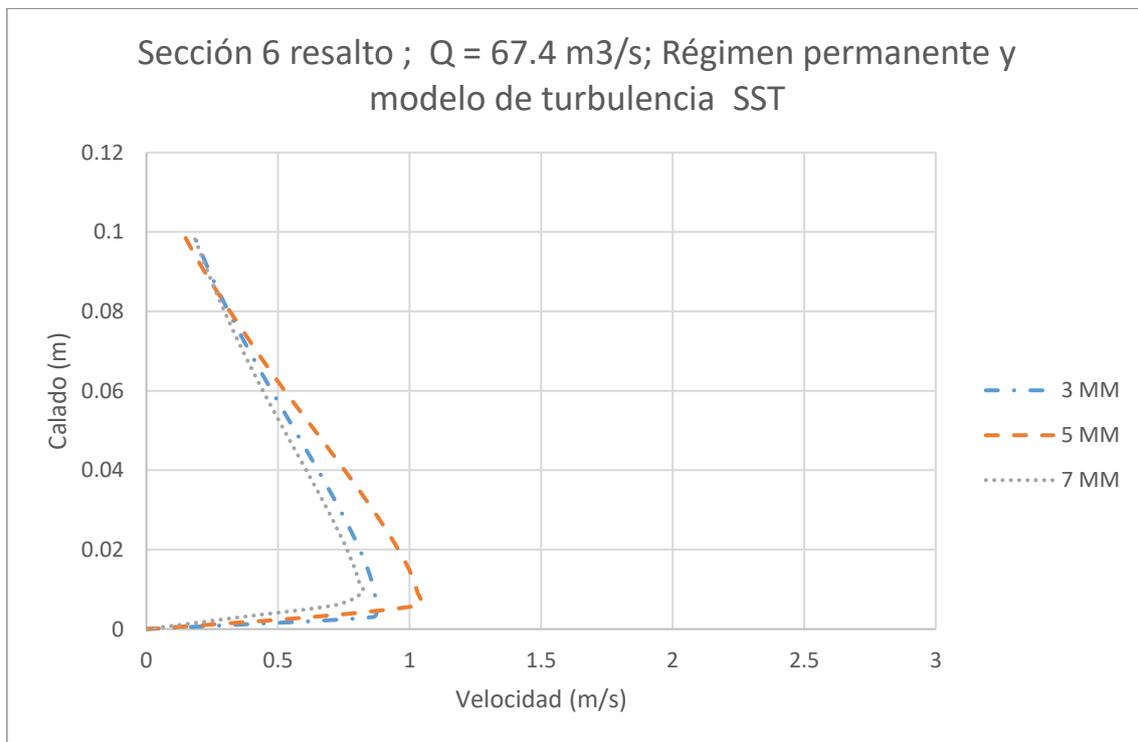


Figura 10. 16. Resultados para sección 6 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia SST

En la Figura 10.17 se muestran los resultados obtenidos para la séptima sección teórica del resalto hidráulico. Se observa una velocidad máxima de 0,75 m/s para el mallado de 3 y de 5 mm y un calado de 0,008 m. La velocidad máxima para el mallado de 7 mm es de 0,65 m/s para un calado de 0,011m.

Las diferencias entre los dos mallados con menor tamaño de celda vuelven a ser despreciables. Para el mallado de 7 mm sí existen diferencias, siendo menor la velocidad máxima. Esto puede deberse tanto al tamaño de celda más grande, lo que reduce la precisión del modelo, como a un atraso de la sección respecto al inicio del resalto.

La disipación de energía continúa existiendo y la velocidad es menor que en las secciones anteriores.

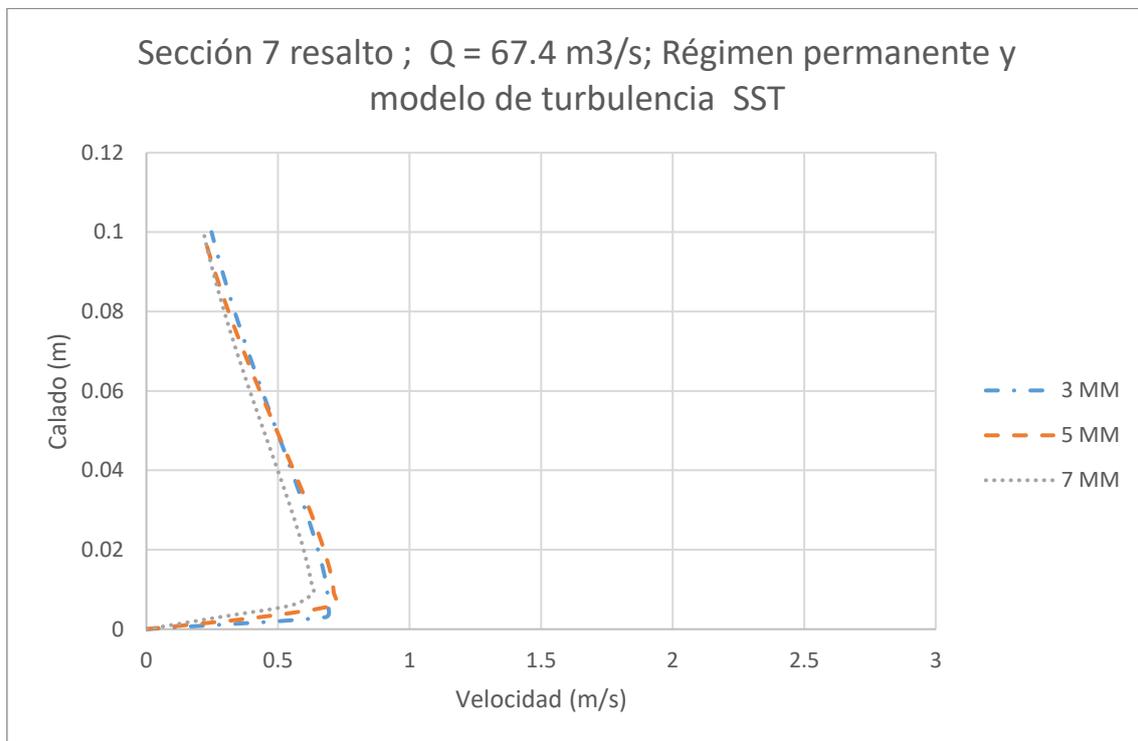


Figura 10. 17. Resultados para sección 7 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia SST

Los resultados obtenidos para la octava sección teórica del resalto hidráulico se muestran en la Figura 10.18. Se observa una velocidad máxima de 0,6 m/s para los tres mallados, solo existiendo una pequeña variación en el calado.

La velocidad máxima es la menor alcanzada y vemos como comienza a estabilizarse, indicando el final del resalto.

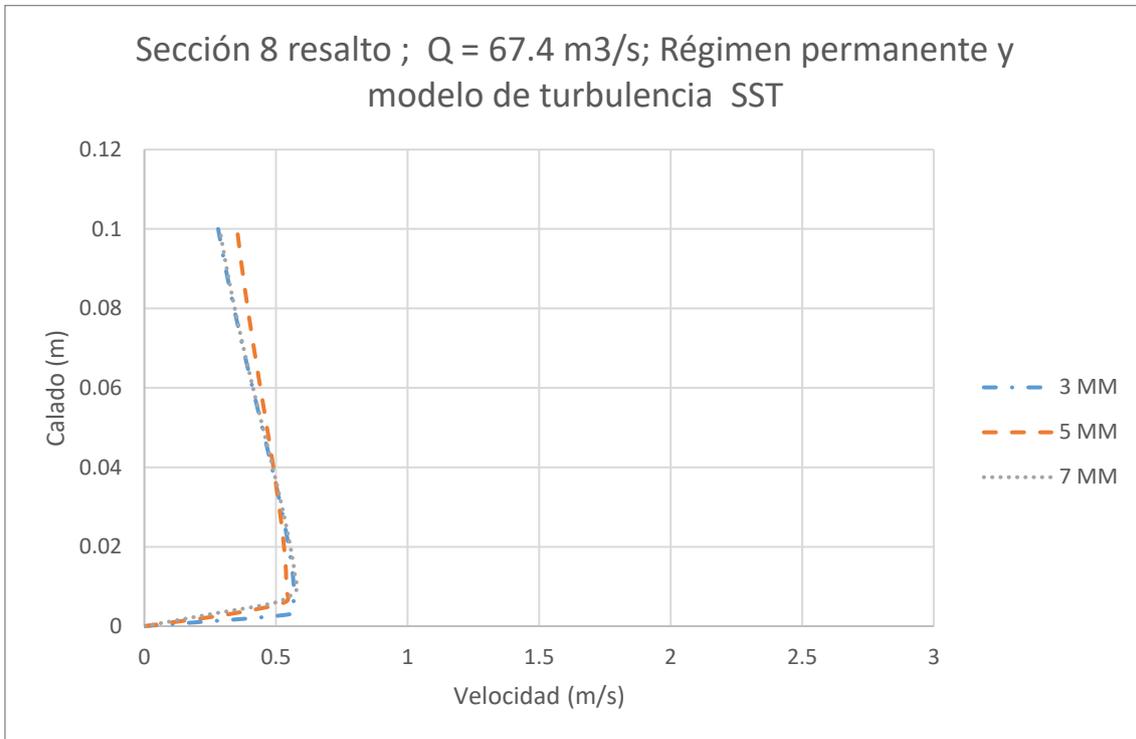


Figura 10. 18. Resultados para sección 8 del resalto hidráulico en régimen permanente y modelo de turbulencia SST

### 10.3.3 Régimen transitorio y modelo de turbulencia K-Épsilon

Por último, el modelo ha sido simulado en régimen transitorio y un modelo de turbulencia K- $\epsilon$ , en este apartado se recogen los perfiles de velocidad obtenidos. Tal y como hemos hecho anteriormente, los resultados van a ser expuestos por secciones, diferenciando por tamaño de mallado.

La Figura 10.19 muestran los resultados para la segunda sección teórica del resalto hidráulica. Las diferencias entre un mallado de 3 mm y de 5 mm son muy reducidas, alcanzándose en ambos modelos una velocidad máxima de 2,35 m/s para un calado de 0,01 m. Para un mallado de 7 mm lo resultados sí existe una pequeña desviación, siendo la velocidad máxima de 2,1 m/s para un calado de 0,01 m.

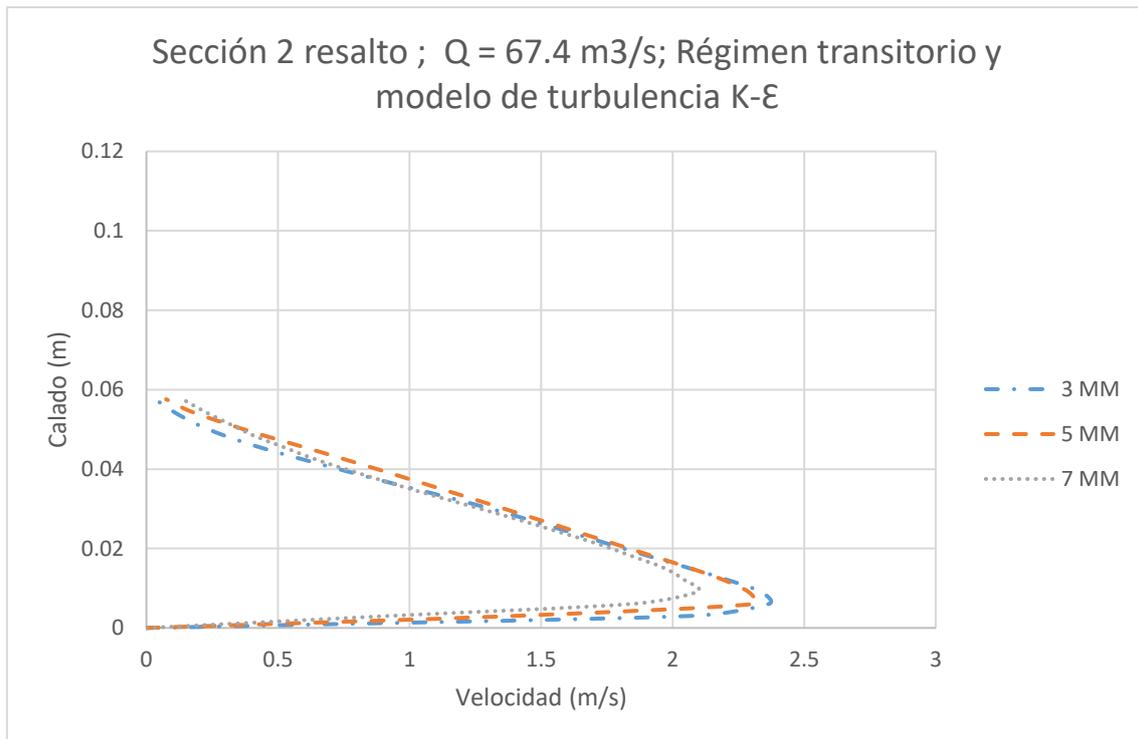


Figura 10. 19. Resultados para sección 2 del resalto hidráulico en régimen transitorio y modelo de turbulencia K- $\epsilon$

Los resultados relativos a la tercera sección teórica del resalto hidráulico se muestran en la Figura 10.20. Nos volvemos a encontrar en la misma situación descrita anteriormente, diferencias muy reducidas entre los dos mallados con un menor tamaño de celda, alcanzando una velocidad máxima de 1,85 m/s para un calado de 0,006 m y una mayor desviación para el mallado mayor, siendo la velocidad máxima de 1,75 m/s y un calado de 0,009 m.

Vemos que la velocidad máxima ya ha disminuido respecto a la sección anterior por la disipación de energía que origina el propio resalto.

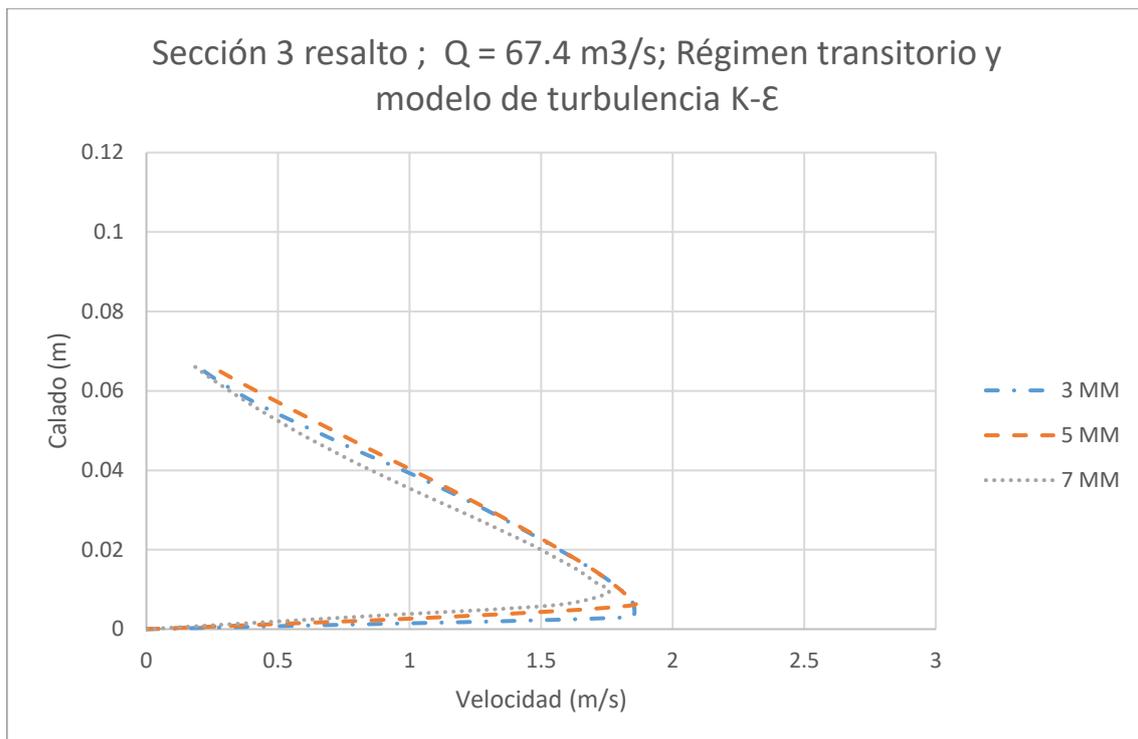


Figura 10. 20. Resultados para sección 3 del resalto hidráulico en régimen transitorio y modelo de turbulencia K-ε

En la Figura 10.21 podemos ver los resultados para la cuarta sección teórica del resalto hidráulico. En el mallado de 3 y 5 mm el calado es de 0,004 m cuando la velocidad alcanza su valor máximo, siendo 1,38 m/s. La mayor desviación es para el mallado de 7 mm, siendo la velocidad máxima de 1,42 m/s y el calado 0,009 m.

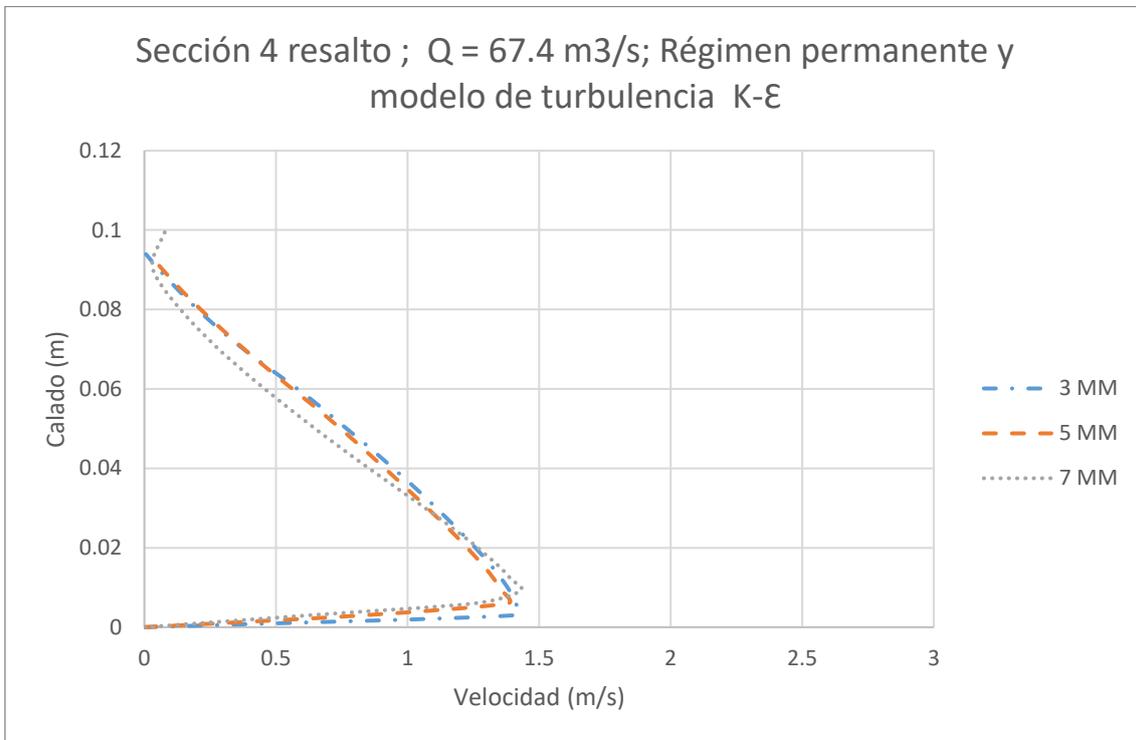


Figura 10. 21. Resultados para sección 4 del resalto hidráulico en régimen transitorio y modelo de turbulencia K- $\epsilon$

En la Figura 10.22 podemos ver los resultados obtenidos para la quinta sección del resalto hidráulico. En esta ocasión sí que se observa una diferencia respecto a las secciones anteriores, a pesar de que las diferencias entre los dos mallados más pequeños continúan siendo despreciables, alcanzando una velocidad máxima de 0,9 m/s para un calado de 0,003 m, sí que vemos que el modelo con una mallado de 7 mm se desvía de una forma más significativa.

La velocidad máxima alcanzada para este último modelo es mayor que en los otros dos, esto nos indica que esta sección se encuentra ubicada en una situación más cercana a su inicio que en los otros dos modelos. Indicar que, para cada simulación, dependiendo del tipo de mallado, régimen y modelo de turbulencia, el resalto comienza en un punto distinto y su longitud varía, siendo complejo ubicar las secciones teóricas siempre en el mismo punto.

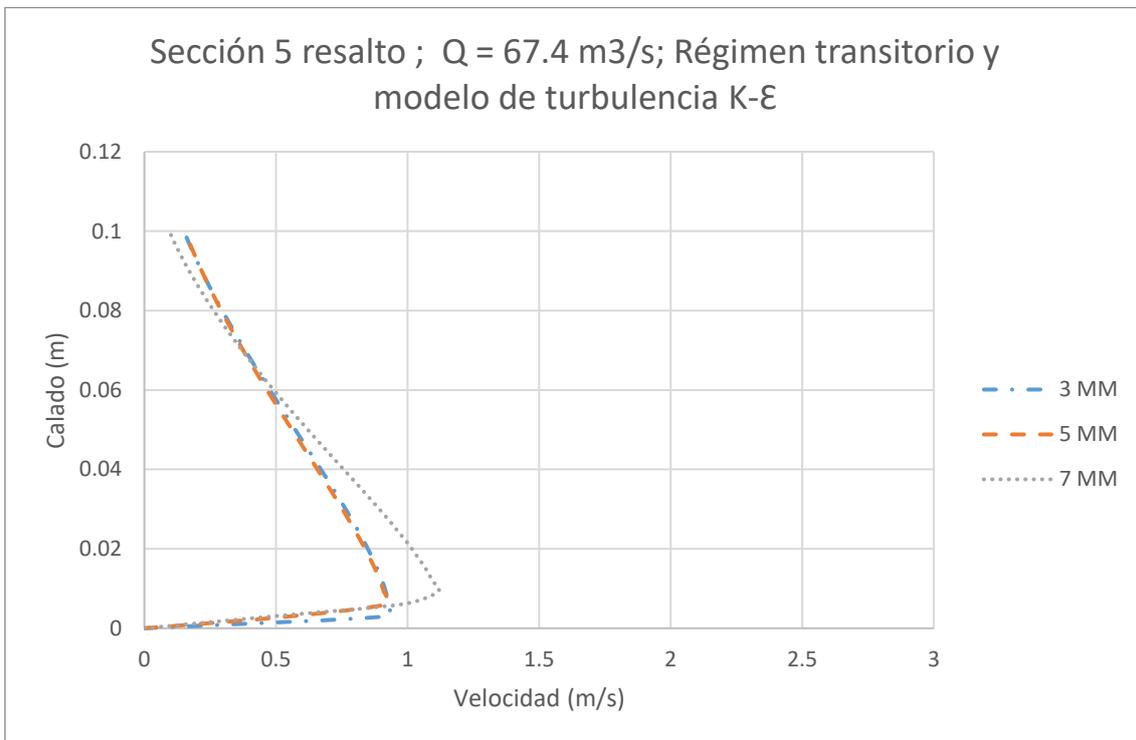


Figura 10. 22. Resultados para sección 5 del resalto hidráulico en régimen transitorio y modelo de turbulencia K-ε

Los resultados para la sexta sección del resalto se pueden ver en la Figura 10.23. A penas se observan diferencias entre los dos modelos con un menor tamaño de celda, siendo la velocidad máxima de 0,65 m/s para un calado de 0,003 m. La velocidad máxima para el mallado de siete mm es mayor, lo que puede deberse al tamaño de la celda o al posicionamiento de la sección.

De cualquier modo, la velocidad continúa disminuyendo respecto a las secciones anteriores, lo que buena señal porque una de las funciones del resalto hidráulico es la disipación de energía con la consiguiente disminución de velocidad.

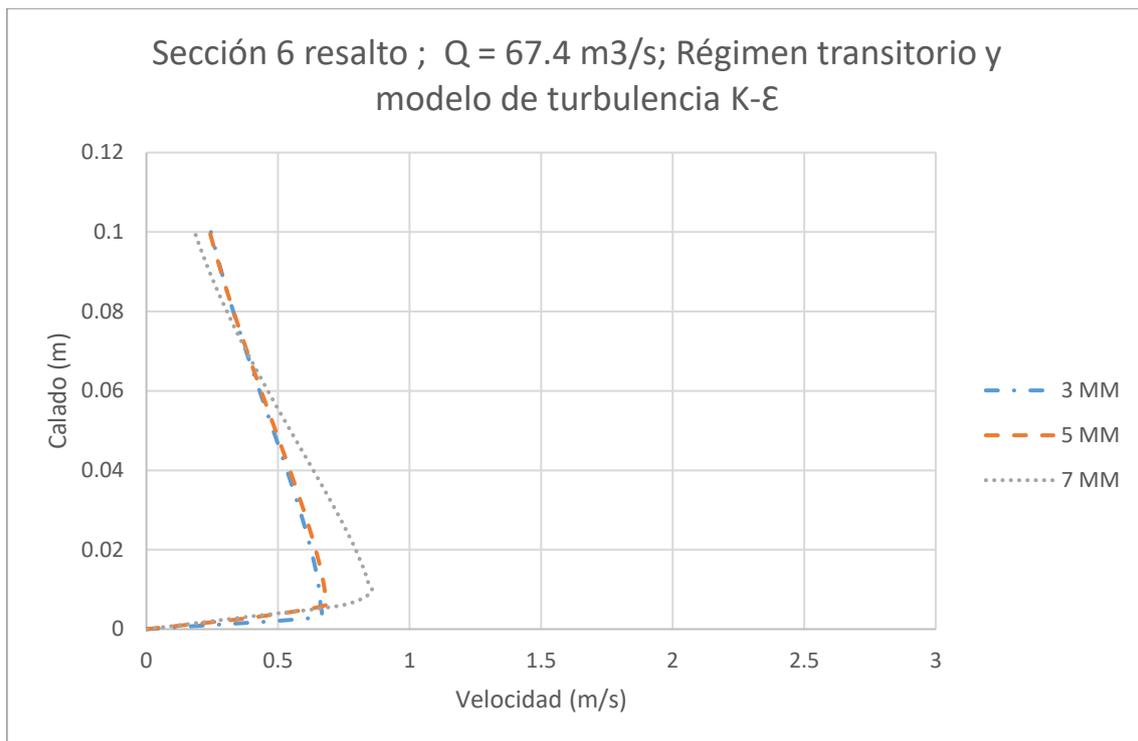


Figura 10. 23. Resultados para sección 6 del resalto hidráulico en régimen transitorio y modelo de turbulencia K-ε

En la figura 10. 24 se muestran los resultados obtenidos para la penúltima sección del resalto hidráulico en análisis. Para el mallado con tamaño de celda 3 mm y el de 5 mm, la velocidad máxima es de 0,6 m/s para un calado de 0,003 m. Para el mallado de 7 mm la velocidad máxima es de 0,67 m/s y se da en un calado de 0,01 m.

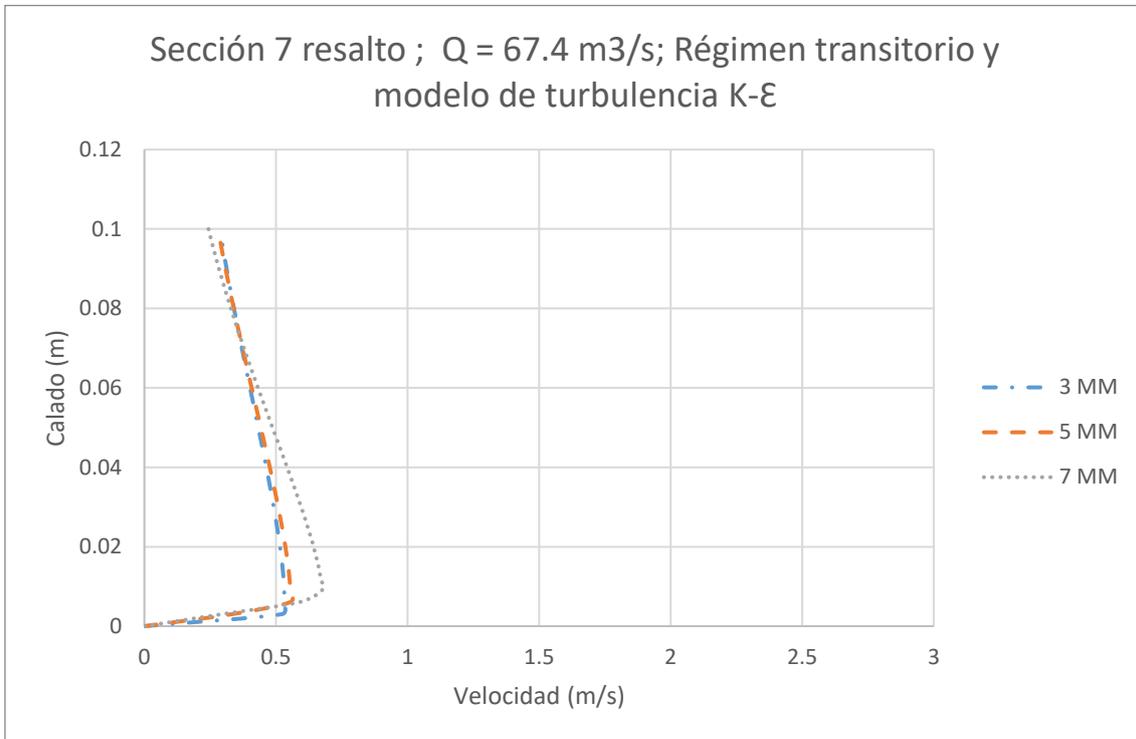


Figura 10. 24. Resultados para sección 7 del resalto hidráulico en régimen transitorio y modelo de turbulencia K-ε

En la figura 10. 25 se muestran los resultados obtenidos para la última sección del resalto hidráulico simulado en régimen transitorio. Para el mallado con tamaño de celda 3 mm y el de 5 mm, la velocidad máxima es de 0,45 m/s para un calado de 0,003 m. Para el mallado de 7 mm la velocidad máxima es de 0,55 m/s y se da en un calado de 0,01 m. La curva que describen las velocidades alcanza un valor máximo y a partir de ese valor permanece prácticamente constante, esto es indicativo de que el resalto ha llegado a su fin.

Analizadas cada una de las secciones teóricas del resalto hidráulico tras realizar las simulaciones en régimen permanente y transitorio con distintos modelos de turbulencia, podemos concluir que el modelo que tomaremos como base en los análisis futuros será el modelo con una mallado de tres mm. Este tamaño de mallado ha sido seleccionado porque no existen diferencias significativas con el mallado de tamaño superior, por lo que podemos considerar que los resultados son lo suficientemente estables.

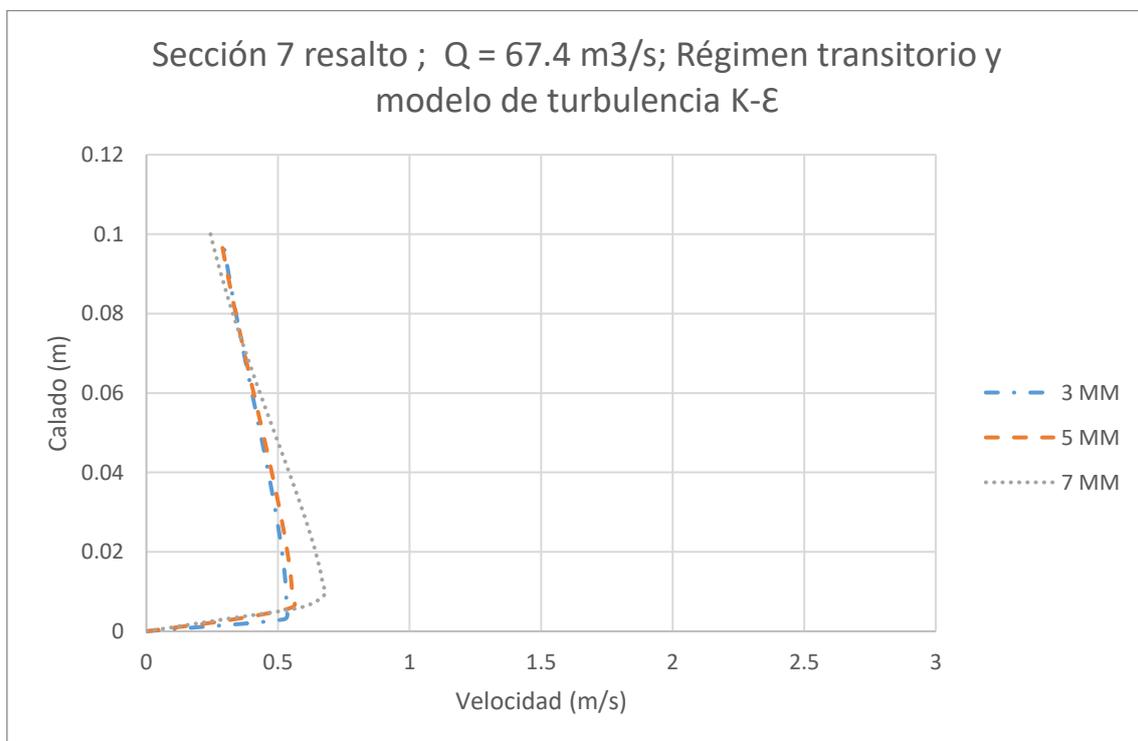


Figura 10. 25. Resultados para sección 8 del resalto hidráulico en régimen transitorio y modelo de turbulencia K-ε

## 10.4 Secciones resalto hidráulico completo para un de mallado de 3 mm, simulado en régimen permanente y transitorio con distintos modelos de turbulencia (comparativa con resultados experimentales)

En este apartado se realiza una comparativa entre los distintos modelos turbulencia para un mallado de 3 mm, se realizará un análisis para cada una de las secciones teóricas del resalto. En esta ocasión, se trabajará con datos adimensionalizados y se incluyen los datos medidos en laboratorio.

La Figura 10.26 muestra los perfiles de velocidades obtenidos en la segunda sección teórica del resalto hidráulico. Vemos que las curvas descritas, tanto por los datos obtenidos en laboratorio como por los obtenidos tras simular el modelo numérico, son muy aproximadas. Esto indica que la medición se ha realizar en una sección situada en la misma ubicación respecto a cada resalto.

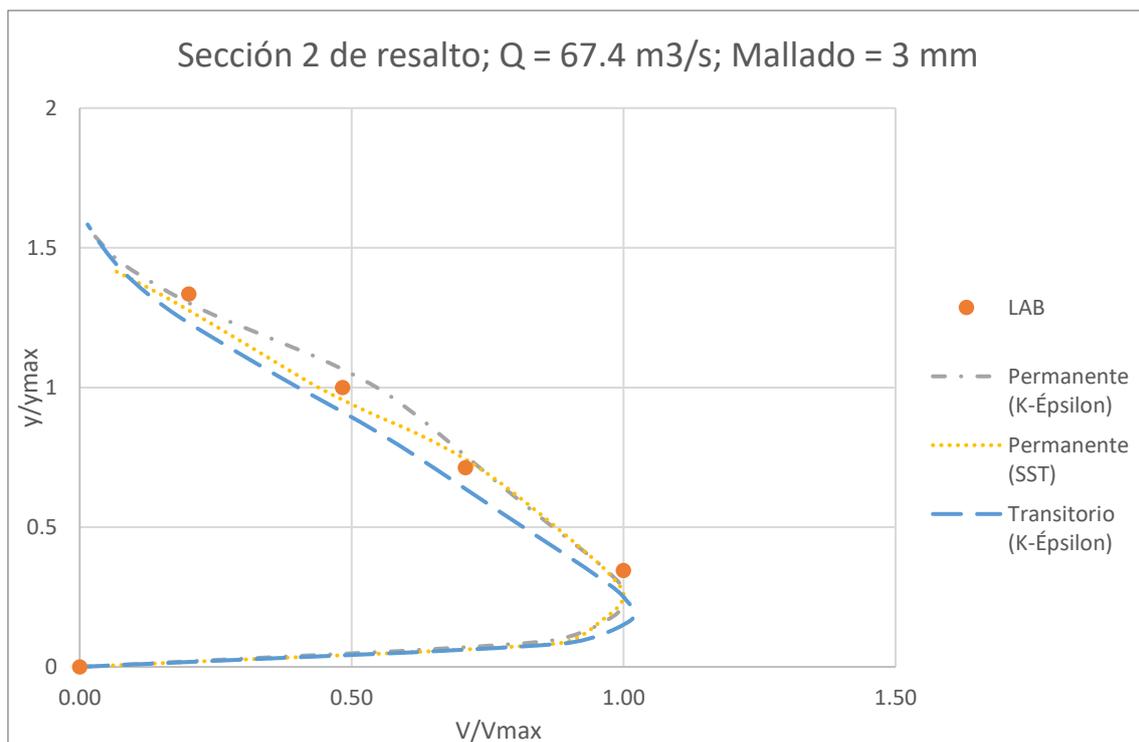


Figura 10. 26. Resultado adimensionalizados para sección 2 del resalto hidráulico con mallado de 3 mm

En la Figura 10.27 se muestran los resultados adimensionalizados para los perfiles de velocidad en la tercera sección teórica del resalto (respecto a su inicio). Volvemos a ver una gran similitud entre los datos obtenidos en laboratorio y los obtenidos mediante el modelo numérico, lo que es indicativo de que la sección se encuentra ubicada en el mismo punto del resalto.

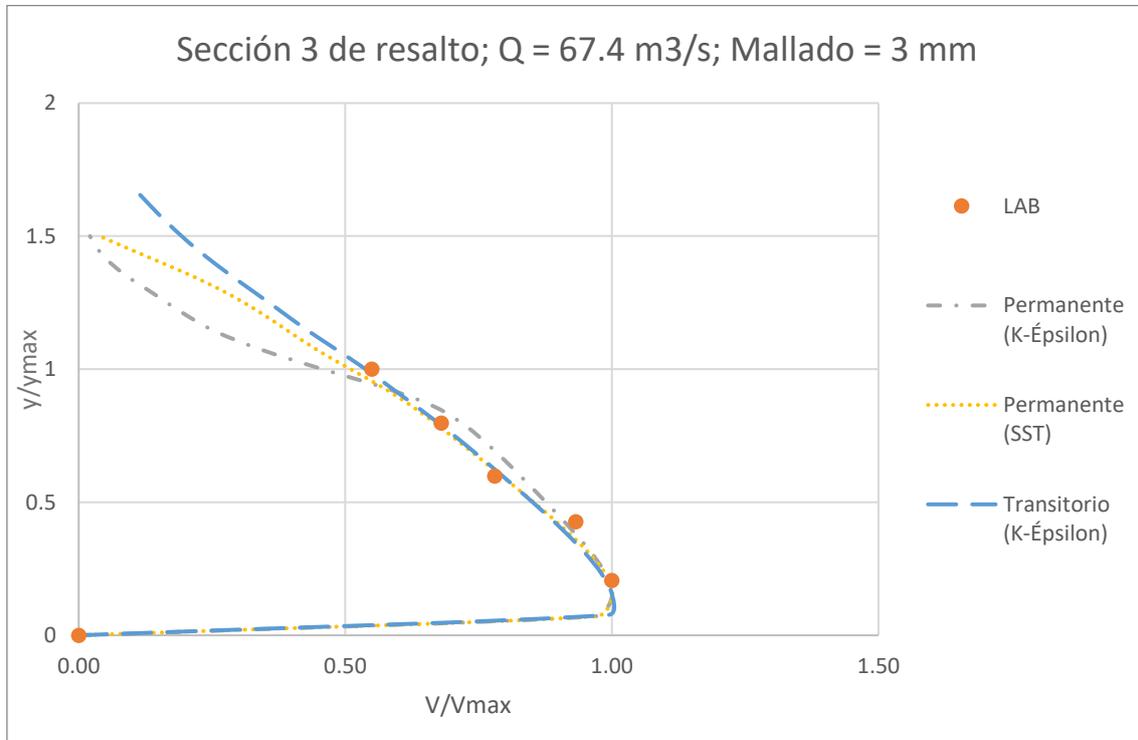


Figura 10. 27. Resultado adimensionalizados para sección 3 del resalto hidráulico con mallado de 3 mm

En la Figura 10.28, 10.29, 10.30 y 10.31 se muestran los perfiles de velocidad para las secciones 4, 5, 6, 7 y 8 del resalto hidráulico, respectivamente. En todas se observa el mismo patrón: unos resultados de laboratorio que cada vez se desvían más de los resultados obtenidos mediante el modelo numérico, tendiendo a un valor constante. Este comportamiento indica que el resalto está comenzando a llegar su fin, pues la disipación de energía comienza a disminuir hasta llegar a sus mínimos, lo que provoca esa velocidad constante e incluso aumente ligeramente en la última sección.

Por su parte, los resultados correspondientes al modelo numérico muestran diferentes desarrollos del resalto.

Cabe destacar, que esta gran diferencia tiene como origen la gran dificultad en tener claro un criterio único que permita definir la longitud del resalto a la vista.

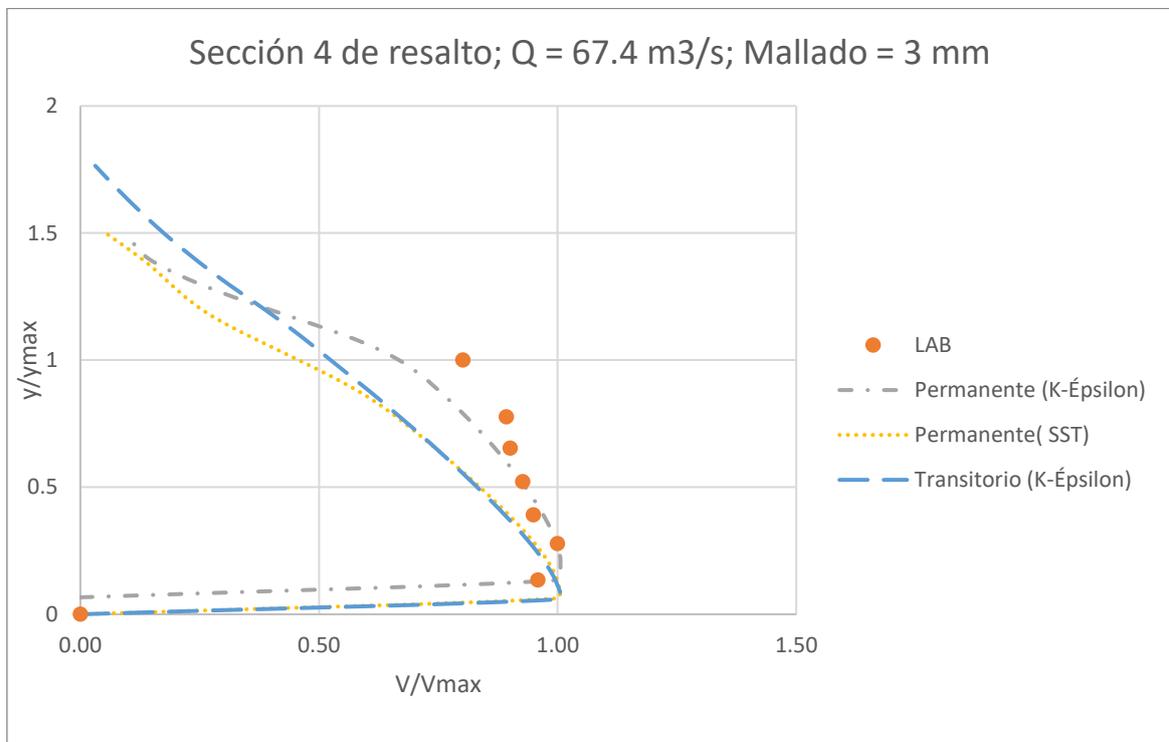


Figura 10. 28. Resultado adimensionalizados para sección 4 del resalto hidráulico con mallado de 3 mm

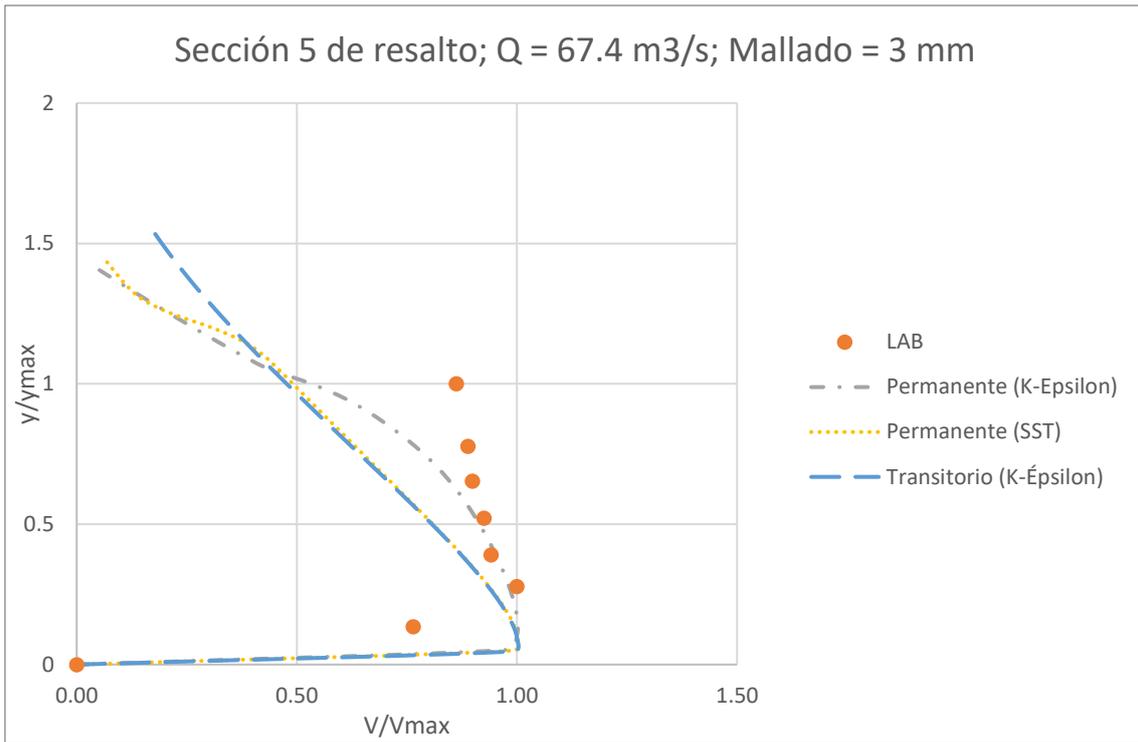


Figura 10. 29. Resultado adimensionalizados para sección 5 del resalto hidráulico con mallado de 3 mm

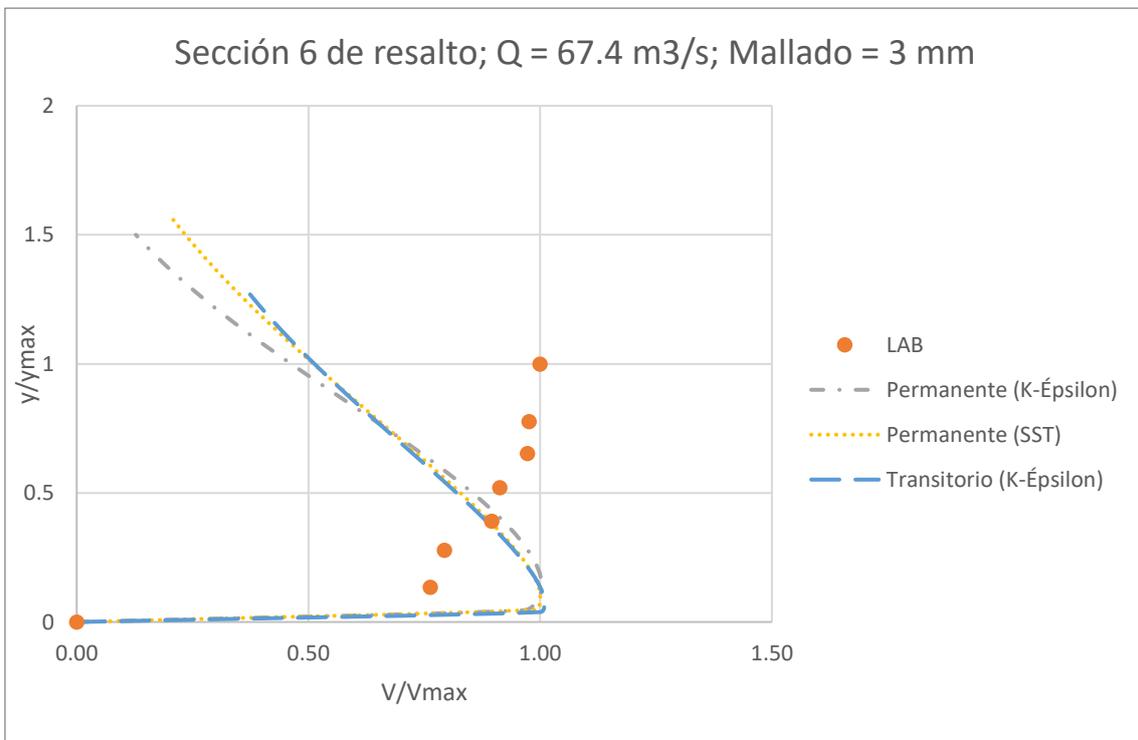


Figura 10. 30. Resultado adimensionalizados para sección 6 del resalto hidráulico con mallado de 3 mm

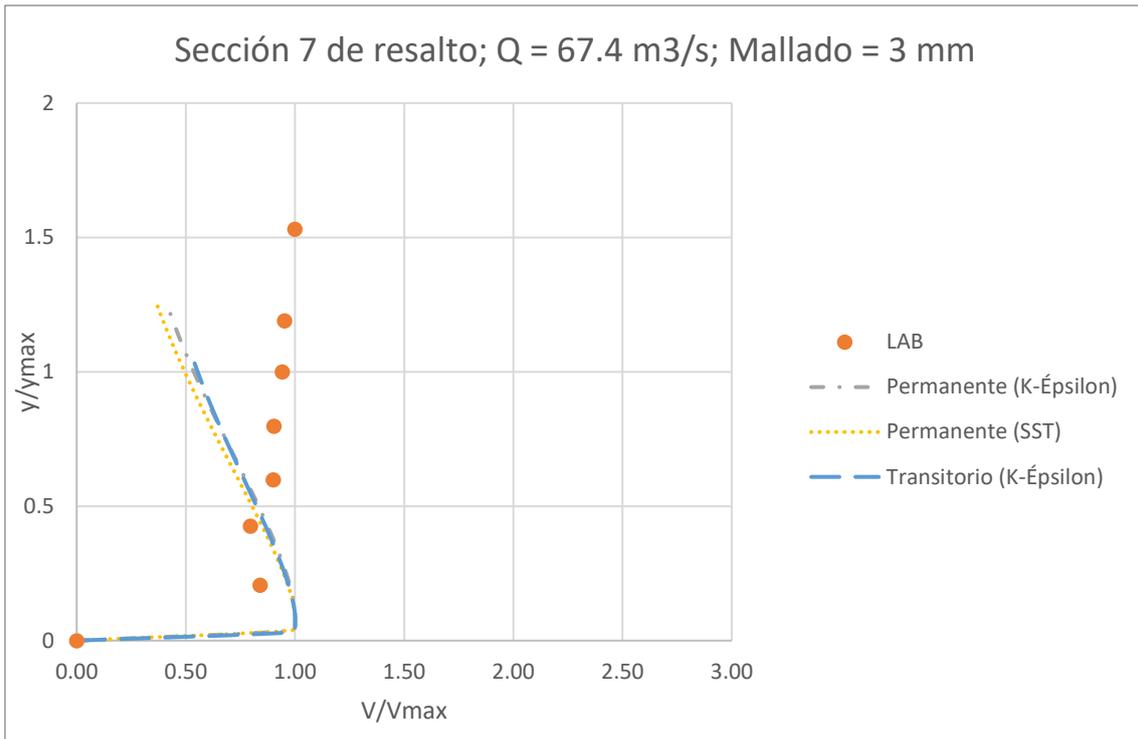


Figura 10. 31. Resultado adimensionalizados para sección 7 del resalto hidráulico con mallado de 3 mm

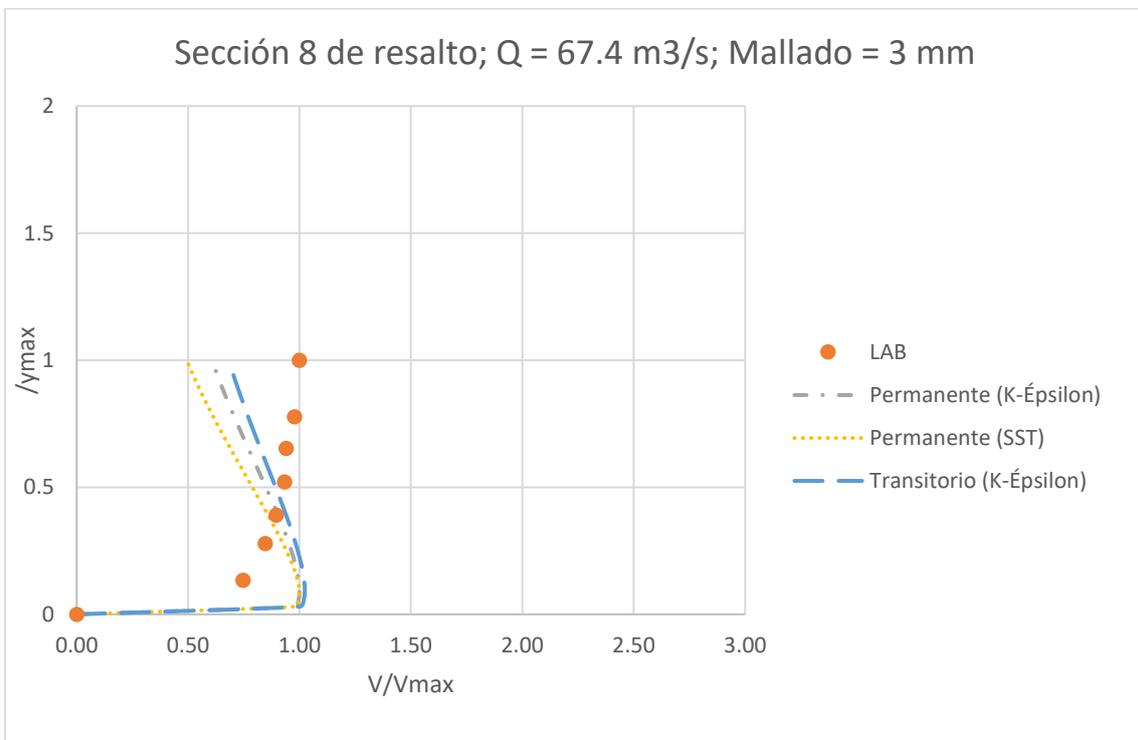


Figura 10. 32. Resultado adimensionalizados para sección 8 del resalto hidráulico con mallado de 3 mm

## 10.5 Energía cinética

La Figura 10.33, 10.34 y 10.35 muestran los resultados para la energía cinética turbulenta (TKE) obtenidos del modelo numérico simulado, caudal  $67.4 \text{ m}^3/\text{s}$  y número de Froude 3.4, en régimen permanente y transitorio, con un modelo de turbulencia K-Épsilon y SST, y mallado de 3 mm.

Como se puede observar, el valor de la energía cinética es mucho mayor en las secciones iniciales del resalto donde apenas acaba de comenzar la disipación de energía. En estas secciones, la energía cinética aumenta hasta alcanzar un valor máximo y, a partir de ese instante, comienza a disminuir. Por ejemplo, para la segunda sección teórica del resalto, en régimen transitorio, la energía aumenta hasta alcanzar un valor de  $0,41 \text{ cm/s}^2$  y, posteriormente, disminuye hasta  $0.2 \text{ cm/s}^2$ .

En las últimas secciones del resalto, la disipación de energía que se ha producido alcanza su máximo, siendo la energía cinética máxima mucho menor que en las secciones iniciales. Vemos que, en estas últimas secciones, el valor de la energía es prácticamente constante debido a que el resalto está finalizando.

Si comparamos los valores obtenidos basándonos en el régimen establecido en la simulación, observamos mayores valores para el régimen permanente, independientemente del modelo de turbulencia, con unos valores máximos de  $0.52$  y  $0.41 \text{ cm/s}^2$  respectivamente. Por su parte, para un régimen transitorio, el valor máximo es de  $0.40 \text{ cm/s}^2$ .

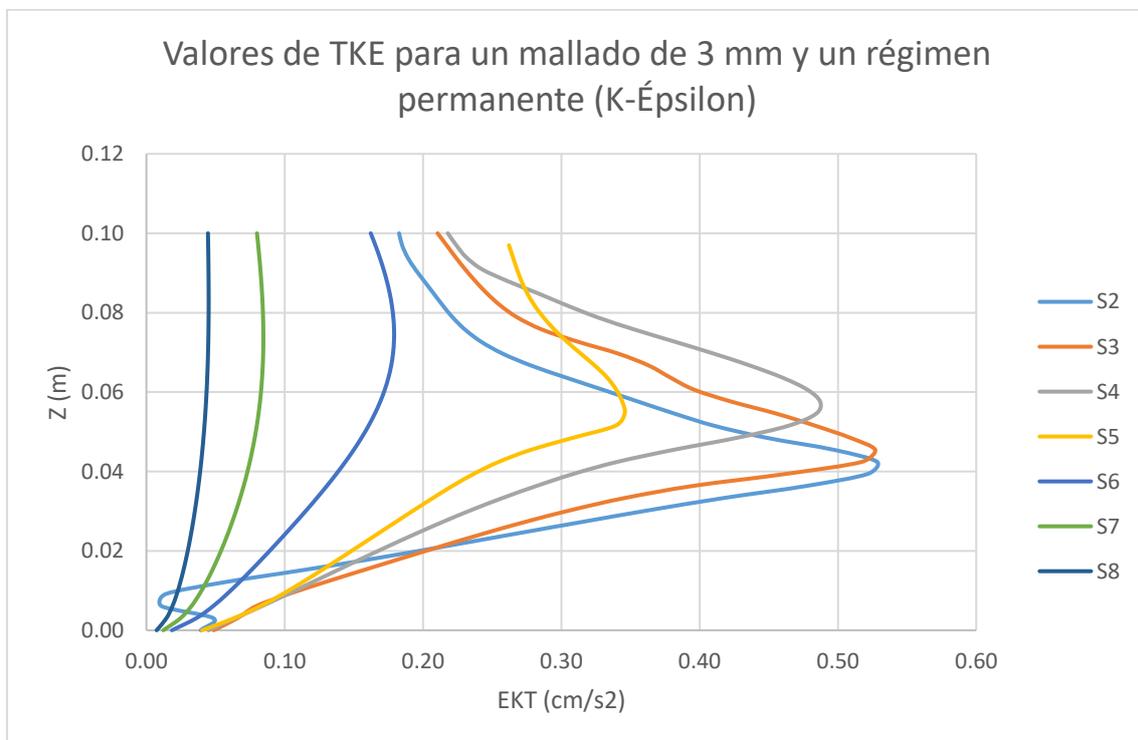


Figura 10. 33. Energía cinética en régimen permanente (K-épsilon) para un caudal de  $67.4 \text{ m}^3/\text{s}$  y Froude 3.4

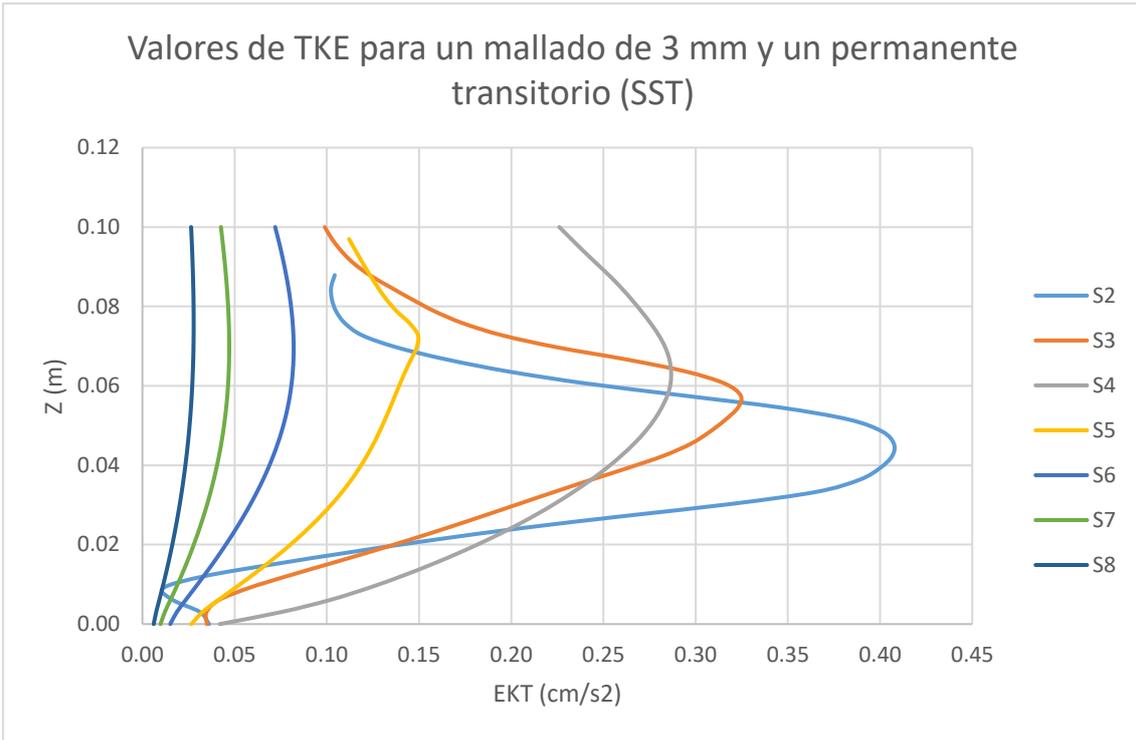


Figura 10. 34. Energía cinética en régimen permanente (SST) para un caudal de 67.4 m<sup>3</sup>/s y Froude 3.4

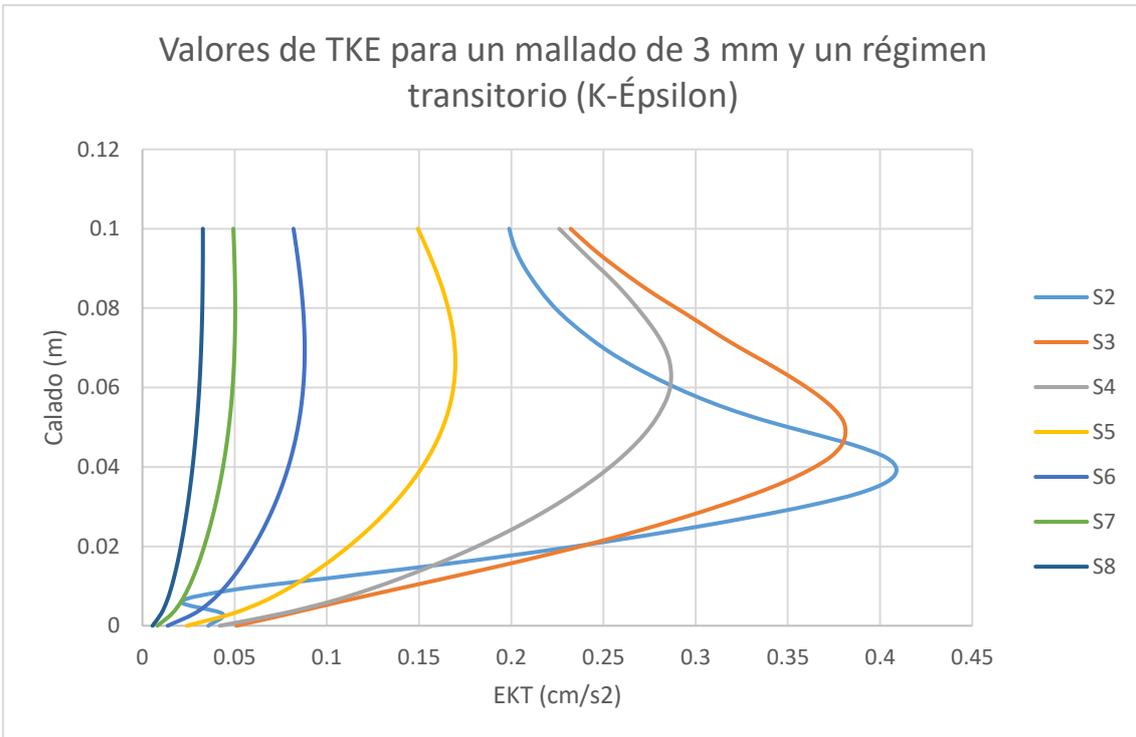


Figura 10. 35. Energía cinética en régimen transitorio (K-épsilon) para un caudal de 67.4 m<sup>3</sup>/s y Froude 3.4

# 11 Conclusiones

---

Tras uso del equipo Doppler para la medida de velocidades instantáneas y la adquisición de datos, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Los principales parámetros establecidos para la configuración de la sonda han sido el rango de velocidad de + 100 cm/s y + 250 cm/s y una frecuencia de muestreo de 5Hz. Como se ha comentado anteriormente, el equipo de medida de velocidades instantáneas ADV necesita estar sumergido, pero la sonda no funciona correctamente en flujo con aire incorporado, lo que ocurre en el caso de los resaltos hidráulicos. En estas condiciones, es necesario un procedimiento de filtrado para desechar o paliar las anomalías debidas a este fenómeno y dar validez a los datos muestreados.
- Los métodos PSTM y PSTM+C son métodos muy restrictivos y eliminan demasiados datos en series normales; no obstante, en series patológicas, como puede ser la obtenida para un resalto hidráulico, se consigue excelentes resultados.
- La diferencia existente entre los datos medidos y teóricos en cuanto a calado conjugado se refiere es despreciable.
- Existe una reducida desviación entre los datos medidos y teóricos para la longitud del resalto debido a la enorme dificultad que entraña visualizar en el canal de estudio en final del resalto, obteniéndose por lo general valores superiores a los teóricos.
- En referencia a la pérdida de energía, los valores calculados de  $\Delta E/E1$  fueron muy similares a la curva experimental obtenida por el U. S. Bureau of Reclamation.
- La longitud de resalto obtenida para un régimen permanente es la que más se acerca a las 1,20 metros medido en laboratorio. La diferencia con los otros escenarios es algo mayor.
- Sobre la lámina libre, en esta ocasión, las diferencias son menores con el régimen transitorio.
- A pesar de las limitaciones existentes, la forma de los perfiles de velocidad obtenidos es similar a la descrita en la bibliografía.

Por su parte, tras la generación del modelo numérico y su simulación para las condiciones de contorno medidas en laboratorio, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- La modelación numérica con metodología CFD es una excelente herramienta, sin embargo, es necesario disponer de una adecuada calibración y validación de los datos obtenidos. Para esto es necesario trabajar conjuntamente con la modelación física.

- ANSYS CFX tiene la ventaja de simular numéricamente distintos tipos de fluidos al mismo tiempo, esta característica lo convierte en una herramienta muy potente a la hora de simular flujos bifásicos o mezcla aire-agua, como es el caso del resalto hidráulico.
- El mallado es uno de los componentes mas importantes a la hora de validar los resultados de una simulación numérica, y está directamente relacionada con la convergencia de los resultados.
- No se puede hablar de un modelo de turbulencia universal, ya que cada modelo es específico para ciertos casos. Sin embargo, los modelos de dos ecuaciones presentan más robustez y precisión sin excesivos tiempos de cálculo.
- La selección del Paso de Tiempo (time step) es un factor decisivo a la hora de realizar una simulación numérica, pasos de tiempo muy grandes conllevan soluciones numéricas alejadas de la solución analítica real, mientras que pasos muy pequeños generan tiempos de simulación demasiado grandes.

## **ANEXO 1.**

# **RESULTADOS DE FILTRADO A PARTIR DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO**

En este primer anexo se muestran las tablas con los resultados del filtrado a partir de las campañas de muestreo. Los resultados se han clasificado por caudal y número de *Froude*.

Cada una de las columnas que componen las tablas se describirán a continuación.

- *Sección*, cada una de las secciones del resalto situadas a  $\sum n \cdot \frac{1}{8} Lr$
- *y*, distancia del punto medido a la solera
- *y<sub>1</sub>*, calado en la sección supercrítica.
- *y<sub>2</sub>*, calado conjugado.
- *v<sub>1</sub>*, velocidad media en la sección supercrítica.
- *y<sub>máx</sub>*, calado total de la sección transversal.
- *% calado*, cociente entre la distancia del punto de muestreo desde la solera y el calado total de la sección.
- *Desviación estándar*, desviación estándar de la muestra.
- *Velocidad media*, velocidad media de la muestra.
- *Número de spikes total*, número total de datos erróneos eliminados tras el filtrado.

Los datos en **negrita** corresponden a los pasos de filtrado seleccionados para cada muestra.

Caudal 33.5 m <sup>3</sup> /h y Froude 9.33																
Sección	Y	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)	Y <sub>máx</sub> (cm)	% Calado	Y/Y <sub>1</sub>	V <sub>1</sub> (cm/s)	V/V <sub>1</sub>	Serie original		Primer filtrado			Segundo filtrado		
									V <sub>m</sub> original	Desviación Estándar original	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)	Nº Spikes total	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)	Nº Spikes total
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,02	12,97	3,01	0,34	0,99	295,20	0,25	81,33	60,76	80,34	41,69	645	<b>74,10</b>	<b>33,59</b>	1422
3	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	4	1,02	12,97	4,90	0,21	0,99	295,20	0,17	53,91	34,36	<b>51,08</b>	<b>25,24</b>	636	46,91	20,27	1426
	5	1,02	12,97	4,90	0,43	2,05	295,20	0,13	43,24	59,43	41,59	39,48	575	<b>38,07</b>	<b>28,79</b>	1364
	6	1,02	12,97	4,90	0,60	2,87	295,20	0,08	26,96	22,79	<b>24,06</b>	<b>16,92</b>	636	20,91	12,98	1406
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,02	12,97	5,10	0,20	0,99	295,20	0,05	15,18	24,29	<b>13,49</b>	<b>17,10</b>	703	12,18	12,71	1502
	5	1,02	12,97	5,10	0,41	2,05	295,20	0,06	19,79	32,78	<b>17,93</b>	<b>22,71</b>	592	16,14	16,53	1389
	6	1,02	12,97	5,10	0,57	2,87	295,20	0,07	23,74	22,87	<b>20,58</b>	<b>16,66</b>	687	17,70	12,86	1483
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,02	12,97	5,50	0,18	0,99	295,20	0,04	11,86	14,16	<b>10,67</b>	<b>10,38</b>	687	9,47	7,89	1519
	5	1,02	12,97	5,50	0,38	2,05	295,20	0,04	14,14	25,80	<b>13,14</b>	<b>18,24</b>	727	11,94	13,12	1541
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,02	12,97	5,70	0,18	0,99	295,20	0,04	12,53	18,47	<b>12,17</b>	<b>13,43</b>	695	11,16	10,22	1471
	5	1,02	12,97	5,70	0,37	2,05	295,20	0,04	14,34	26,90	<b>12,92</b>	<b>19,21</b>	695	11,50	13,88	1499
	6	1,02	12,97	5,70	0,51	2,87	295,20	0,05	17,08	12,27	<b>15,65</b>	<b>9,08</b>	749	13,94	7,29	1549
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,02	12,97	5,80	0,17	0,99	295,20	0,06	<b>17,05</b>	<b>14,95</b>	16,01	10,95	706	14,48	8,32	1524
	6	1,02	12,97	5,80	0,51	2,87	295,20	0,07	<b>19,34</b>	<b>11,74</b>	18,54	8,81	696	16,96	7,59	1478
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,02	12,97	5,85	0,17	0,99	295,20	0,08	25,79	22,75	<b>23,52</b>	<b>14,90</b>	620	21,11	11,39	1423
	5	1,02	12,97	5,85	0,36	2,05	295,20	0,07	21,69	24,50	<b>20,51</b>	<b>17,76</b>	669	19,07	13,13	1471
	6	1,02	12,97	5,85	0,50	2,87	295,20	0,08	23,99	16,34	<b>22,70</b>	<b>11,10</b>	718	20,80	8,70	1491

Caudal 39 m <sup>3</sup> /h y Froude 7.55															
Sección	Y	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)	Y <sub>máx</sub> (cm)	% Calado	Y/Y <sub>1</sub>	V <sub>1</sub> (cm/s)	Serie original		Primer filtrado			Segundo filtrado		
								V/V <sub>1</sub>	V <sub>m</sub> original	Desviación Estándar original	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)	Nº Spikes total	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,30	13,26	0,17	0,78	269,70	0,13	42,58	35,06	39,77	25,90	695	<b>35,69</b>	<b>20,02</b>	1482
	5	1,30	13,26	0,35	1,61	269,70	0,13	39,34	43,48	37,95	30,93	626	<b>34,25</b>	<b>23,09</b>	1436
	6	1,30	13,26	0,50	2,25	269,70	0,11	36,51	35,80	33,34	25,70	690	<b>29,55</b>	<b>19,14</b>	1492
	7	1,30	13,26	0,66	3,01	269,70	0,09	28,20	35,02	<b>25,01</b>	<b>24,92</b>	687	21,93	18,18	1501
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,30	13,26	0,16	0,78	269,70	0,09	25,97	21,09	<b>23,24</b>	<b>15,27</b>	676	20,50	11,69	1477
	5	1,30	13,26	0,34	1,61	269,70	0,09	27,35	35,97	<b>25,55</b>	<b>24,96</b>	637	23,37	17,98	1452
	6	1,30	13,26	0,47	2,25	269,70	0,09	29,40	19,83	<b>25,62</b>	<b>14,46</b>	689	22,40	11,39	1462
	7	1,30	13,26	0,63	3,01	269,70	0,10	29,39	19,84	<b>26,42</b>	<b>14,74</b>	628	23,60	11,65	1398
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,30	13,26	0,16	0,78	269,70	0,08	23,97	17,58	<b>22,65</b>	<b>12,87</b>	691	20,52	10,10	1477
	5	1,30	13,26	0,33	1,61	269,70	0,09	24,99	25,00	<b>23,31</b>	<b>17,91</b>	715	21,23	13,12	1533
	6	1,30	13,26	0,47	2,25	269,70	0,10	<b>26,56</b>	<b>12,47</b>	24,26	9,66	700	21,88	8,22	1474
	7	1,30	13,26	0,62	3,01	269,70	0,10	<b>27,44</b>	<b>11,36</b>	24,76	9,20	682	19,52	8,07	1381
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,30	13,26	0,16	0,78	269,70	0,09	26,63	29,20	<b>25,04</b>	<b>19,22</b>	676	22,18	13,68	1512
	5	1,30	13,26	0,33	1,61	269,70	0,09	25,38	18,59	<b>23,99</b>	<b>13,63</b>	707	21,54	10,29	1528
	6	1,30	13,26	0,46	2,25	269,70	0,10	<b>27,13</b>	<b>8,30</b>	25,09	7,32	728	23,24	6,90	1416
	7	1,30	13,26	0,61	3,01	269,70	0,11	<b>28,51</b>	<b>8,38</b>	26,43	7,38	745	24,48	7,36	1459
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,30	13,26	0,16	0,78	269,70	0,10	<b>26,43</b>	<b>13,21</b>	24,79	9,63	703	22,81	7,93	1518
	5	1,30	13,26	0,32	1,61	269,70	0,09	27,13	17,65	<b>25,58</b>	<b>12,69</b>	756	23,46	9,79	1531
	6	1,30	13,26	0,45	2,25	269,70	0,10	<b>27,26</b>	<b>6,86</b>	25,44	6,55	733	24,00	6,81	1351
	7	1,30	13,26	0,60	3,01	269,70	0,10	<b>28,03</b>	<b>6,62</b>	25,78	6,62	744	24,28	7,14	1424
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,30	13,26	0,16	0,78	269,70	0,09	26,77	16,57	<b>25,25</b>	<b>11,37</b>	712	23,28	8,82	1494
	5	1,30	13,26	0,32	1,61	269,70	0,10	27,90	16,71	<b>26,80</b>	<b>11,99</b>	727	24,72	9,50	1525
	6	1,30	13,26	0,45	2,25	269,70	0,10	<b>27,65</b>	<b>5,74</b>	25,57	6,23	762	24,22	7,15	1379
	7	1,30	13,26	0,60	3,01	269,70	0,11	<b>29,06</b>	<b>5,89</b>	27,21	6,27	729	25,71	7,39	1389

Caudal 47.8 m <sup>3</sup> /h y Froude 6.19															
Sección	Y	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)	Y <sub>máx</sub> (cm)	% Calado	Y/Y <sub>1</sub>	V <sub>1</sub> (cm/s)	Serie original		Primer filtrado			Segundo filtrado		
								V/V <sub>1</sub>	V <sub>m</sub> original	Desviación Estándar original	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)	Nº Spikes total	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,70	14,06	0,20	0,59	252,80	0,22	61,01	59,42	59,47	40,63	568	54,46	30,31	1356
	5	1,70	14,06	0,42	1,23	252,80	0,18	50,92	64,75	49,79	43,64	618	44,64	31,59	1396
	6	1,70	14,06	0,59	1,72	252,80	0,14	41,32	50,55	39,09	36,13	668	35,31	26,62	1458
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,70	14,06	0,15	0,59	252,80	0,16	47,29	39,40	45,06	28,51	680	41,57	21,71	1467
	5	1,70	14,06	0,30	1,23	252,80	0,16	45,48	53,59	43,74	37,12	677	39,25	27,35	1464
	6	1,70	14,06	0,42	1,72	252,80	0,15	43,73	37,51	41,93	27,48	654	38,11	20,80	1464
	7	1,70	14,06	0,56	2,30	252,80	0,13	40,46	34,97	37,03	26,06	661	33,41	19,75	1449
	8	1,70	14,06	0,71	2,88	252,80	0,12	35,15	35,33	33,06	26,09	626	29,79	19,34	1447
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,70	14,06	0,14	0,59	252,80	0,13	34,47	29,13	31,84	21,24	655	28,77	16,14	1437
	5	1,70	14,06	0,29	1,23	252,80	0,13	35,54	46,24	33,54	31,87	653	29,97	23,34	1466
	6	1,70	14,06	0,40	1,72	252,80	0,15	43,52	25,88	40,46	19,56	621	37,02	15,52	1388
	7	1,70	14,06	0,54	2,30	252,80	0,14	38,45	23,48	35,21	17,46	628	31,69	13,59	1398
	8	1,70	14,06	0,67	2,88	252,80	0,14	38,69	25,02	35,27	18,74	636	31,46	14,69	1429
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,70	14,06	0,13	0,59	252,80	0,13	38,79	37,61	36,50	26,75	662	33,21	20,58	1467
	5	1,70	14,06	0,28	1,23	252,80	0,12	32,31	46,60	31,93	32,02	647	31,01	22,71	1472
	6	1,70	14,06	0,39	1,72	252,80	0,13	32,69	21,23	31,78	15,22	699	30,33	11,43	1501
	7	1,70	14,06	0,51	2,30	252,80	0,13	33,30	13,18	30,64	10,63	674	23,80	9,24	1433
	8	1,70	14,06	0,64	2,88	252,80	0,14	35,06	14,50	32,13	11,30	646	23,41	9,85	1378
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,70	14,06	0,13	0,59	252,80	0,13	38,06	34,70	33,88	22,29	701	30,19	16,68	1503
	5	1,70	14,06	0,27	1,23	252,80	0,12	36,27	36,38	34,09	25,91	688	30,71	19,25	1481
	6	1,70	14,06	0,38	1,72	252,80	0,11	26,84	12,36	26,01	9,27	705	24,22	7,93	1429
	7	1,70	14,06	0,51	2,30	252,80	0,12	30,54	8,98	28,11	7,92	761	26,02	7,90	1458
	8	1,70	14,06	0,64	2,88	252,80	0,12	30,02	9,46	27,68	8,13	722	25,69	7,67	1397
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1,70	14,06	0,13	0,59	252,80	0,12	31,74	25,38	29,21	17,89	655	26,43	13,97	1442
	5	1,70	14,06	0,27	1,23	252,80	0,09	24,69	30,24	23,21	21,60	681	20,59	15,70	1523
	6	1,70	14,06	0,38	1,72	252,80	0,09	21,80	15,62	22,40	11,03	732	21,34	8,76	1529
	7	1,70	14,06	0,51	2,30	252,80	0,11	28,97	8,01	26,89	7,66	771	25,23	8,06	1423
	8	1,70	14,06	0,64	2,88	252,80	0,12	30,57	7,97	28,10	7,51	752	25,41	7,78	1406

Caudal 50 m <sup>3</sup> /h y Froude 4.55																	
Sección	Y	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)	Y <sub>máx</sub> (cm)	% Calado	Y/Y <sub>1</sub>	V <sub>1</sub> (cm/s)	V/V <sub>1</sub>	V <sub>m</sub> original	Serie original			Primer filtrado		Segundo filtrado		
										Desviación Estándar original	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)	Nº Spikes total	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	2,15	12,81	0,24	0,47	209,10	0,34	79,04	47,65	76,93	35,58	589	<b>70,59</b>	<b>28,75</b>	1378		
	5	2,15	12,81	0,50	0,97	209,10	0,23	54,16	47,23	52,28	33,71	668	<b>48,18</b>	<b>25,23</b>	1481		
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	2,15	12,81	0,21	0,47	209,10	0,26	61,62	35,26	59,25	26,74	685	<b>54,66</b>	<b>22,15</b>	1441		
	5	2,15	12,81	0,44	0,97	209,10	0,22	52,34	42,19	49,41	30,53	600	<b>45,40</b>	<b>23,50</b>	1370		
	6	2,15	12,81	0,62	1,36	209,10	0,18	46,28	37,56	42,38	27,14	705	<b>37,12</b>	<b>20,40</b>	1523		
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	2,15	12,81	0,20	0,47	209,10	0,22	48,94	32,09	<b>46,67</b>	<b>23,23</b>	612	42,65	18,75	1398		
	5	2,15	12,81	0,41	0,97	209,10	0,20	47,44	46,36	46,13	31,98	681	<b>42,63</b>	<b>23,66</b>	1488		
	6	2,15	12,81	0,57	1,36	209,10	0,21	47,01	26,99	<b>44,26</b>	<b>20,52</b>	625	40,16	16,87	1378		
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	2,15	12,81	0,18	0,47	209,10	0,19	41,77	26,23	<b>39,16</b>	<b>19,68</b>	685	35,36	15,35	1503		
	5	2,15	12,81	0,36	0,97	209,10	0,19	42,45	39,80	<b>39,73</b>	<b>28,23</b>	700	36,04	20,81	1511		
	6	2,15	12,81	0,51	1,36	209,10	0,19	42,93	17,42	<b>39,77</b>	<b>14,34</b>	647	36,43	12,38	1375		
	7	2,15	12,81	0,68	1,82	209,10	0,18	41,40	17,96	<b>38,26</b>	<b>14,26</b>	695	35,20	12,36	1454		
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	2,15	12,81	0,16	0,47	209,10	0,16	35,13	18,45	<b>32,80</b>	<b>13,60</b>	756	29,92	10,95	1533		
	5	2,15	12,81	0,33	0,97	209,10	0,18	40,34	38,99	<b>38,58</b>	<b>28,11</b>	652	35,97	20,98	1461		
	6	2,15	12,81	0,47	1,36	209,10	0,19	<b>39,76</b>	<b>13,25</b>	36,71	11,22	694	36,71	11,22	694		
	7	2,15	12,81	0,62	1,82	209,10	0,19	<b>40,73</b>	<b>13,26</b>	37,64	11,22	710	35,01	10,57	1405		
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	2,15	12,81	0,16	0,47	209,10	0,16	<b>34,24</b>	<b>14,76</b>	32,50	11,41	702	30,05	9,98	1442		
	5	2,15	12,81	0,32	0,97	209,10	0,17	36,55	34,96	<b>34,96</b>	<b>25,04</b>	654	32,33	18,58	1457		
	6	2,15	12,81	0,45	1,36	209,10	0,18	<b>38,16</b>	<b>10,07</b>	35,35	9,18	707	33,18	9,16	1385		
	7	2,15	12,81	0,60	1,82	209,10	0,19	<b>38,69</b>	<b>9,88</b>	35,57	9,37	737	33,38	9,54	1423		
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	2,15	12,81	0,15	0,47	209,10	0,15	35,45	37,99	34,12	26,71	676	<b>30,82</b>	<b>19,57</b>	1499		
	5	2,15	12,81	0,31	0,97	209,10	0,15	35,29	43,87	33,42	30,67	658	<b>30,85</b>	<b>22,14</b>	1437		
	6	2,15	12,81	0,44	1,36	209,10	0,18	<b>37,87</b>	<b>8,20</b>	34,92	8,44	753	32,90	9,52	1405		
	7	2,15	12,81	0,58	1,82	209,10	0,18	<b>38,60</b>	<b>8,16</b>	35,82	8,44	725	33,98	9,63	1307		

Caudal 55 m <sup>3</sup> /h y Froude 5.18															
Sección	Y	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)	Y <sub>máx</sub> (cm)	% Calado	Y/Y <sub>1</sub>	V <sub>1</sub> (cm/s)	Serie original		Primer filtrado			Segundo filtrado		
								V/V <sub>1</sub>	V <sub>m</sub> original	Desviación Estándar original	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)	Nº Spikes total	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,10	11,40	0,20	0,48	235,40	0,33	79,71	52,40	<b>77,79</b>	<b>38,11</b>	582	72,26	30,10	1352
	5	2,10	11,40	0,42	1,00	235,40	0,24	57,83	50,40	<b>56,45</b>	<b>36,26</b>	615	51,79	27,70	1476
	6	2,10	11,40	0,59	1,40	235,40	0,16	42,61	49,47	40,25	35,79	636	<b>36,64</b>	<b>26,27</b>	1453
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,10	11,40	0,15	0,48	235,40	0,25	65,45	38,57	62,83	28,73	674	<b>58,07</b>	<b>23,20</b>	1442
	5	2,10	11,40	0,30	1,00	235,40	0,23	57,77	37,56	<b>54,66</b>	<b>28,20</b>	701	49,83	22,21	1513
	6	2,10	11,40	0,42	1,40	235,40	0,21	53,24	39,91	<b>49,24</b>	<b>29,30</b>	693	44,29	22,81	1493
	7	2,10	11,40	0,57	1,86	235,40	0,15	39,67	38,28	<b>35,84</b>	<b>27,83</b>	673	31,63	20,71	1479
	8	2,10	11,40	0,71	2,33	235,40	0,12	32,61	38,00	<b>28,44</b>	<b>27,40</b>	695	24,82	20,17	1515
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,10	11,40	0,13	0,48	235,40	0,19	47,93	32,12	<b>45,17</b>	<b>23,32</b>	676	40,80	18,23	1452
	5	2,10	11,40	0,27	1,00	235,40	0,18	44,58	29,10	<b>41,69</b>	<b>21,95</b>	671	37,49	17,51	1441
	6	2,10	11,40	0,38	1,40	235,40	0,18	45,38	25,82	<b>41,75</b>	<b>19,60</b>	636	37,98	16,17	1375
	7	2,10	11,40	0,51	1,86	235,40	0,16	41,32	25,74	<b>37,70</b>	<b>19,14</b>	673	33,65	15,29	1449
	8	2,10	11,40	0,63	2,33	235,40	0,15	39,03	25,48	<b>36,04</b>	<b>19,04</b>	607	32,68	15,22	1376
	9	2,10	11,40	0,75	2,78	235,40	0,13	35,03	24,96	<b>31,40</b>	<b>18,15</b>	676	28,41	14,22	1438
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,10	11,40	0,12	0,48	235,40	0,14	35,98	18,34	<b>33,31</b>	<b>13,95</b>	650	30,37	11,52	1406
	5	2,10	11,40	0,25	1,00	235,40	0,15	37,03	24,55	<b>34,51</b>	<b>18,16</b>	673	31,41	14,25	1465
	6	2,10	11,40	0,35	1,40	235,40	0,15	38,13	15,98	<b>34,98</b>	<b>12,79</b>	664	32,07	11,09	1341
	7	2,10	11,40	0,46	1,86	235,40	0,15	38,55	15,34	<b>35,08</b>	<b>12,39</b>	701	32,20	10,84	1396
	8	2,10	11,40	0,58	2,33	235,40	0,15	38,58	16,16	<b>35,77</b>	<b>12,87</b>	625	32,44	11,11	1408
	9	2,10	11,40	0,69	2,78	235,40	0,14	36,82	15,43	<b>33,66</b>	<b>12,12</b>	656	30,62	10,38	1405
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,10	11,40	0,12	0,48	235,40	0,13	32,42	19,49	<b>30,40</b>	<b>14,67</b>	721	27,91	11,68	1509
	5	2,10	11,40	0,25	1,00	235,40	0,14	35,20	20,53	<b>32,96</b>	<b>14,92</b>	695	30,35	11,90	1470
	6	2,10	11,40	0,34	1,40	235,40	0,14	35,20	20,53	<b>32,96</b>	<b>14,92</b>	695	30,10	9,81	1353
	7	2,10	11,40	0,46	1,86	235,40	0,14	35,76	11,54	<b>32,62</b>	<b>9,95</b>	729	30,14	9,41	1419
	8	2,10	11,40	0,57	2,33	235,40	0,14	36,52	10,84	<b>33,82</b>	<b>9,36</b>	696	31,58	9,13	1379
	9	2,10	11,40	0,68	2,78	235,40	0,15	37,18	10,66	<b>34,52</b>	<b>9,41</b>	707	32,05	9,28	1418
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,10	11,40	0,12	0,48	235,40	0,13	32,42	19,49	<b>30,40</b>	<b>14,67</b>	721	29,75	15,98	1440
	5	2,10	11,40	0,24	1,00	235,40	0,14	33,43	22,89	<b>31,80</b>	<b>16,36</b>	710	28,89	12,53	1502
	6	2,10	11,40	0,34	1,40	235,40	0,15	<b>34,24</b>	<b>8,91</b>	31,58	8,40	756	29,48	9,03	1414
	7	2,10	11,40	0,45	1,86	235,40	0,15	<b>34,78</b>	<b>8,92</b>	32,23	8,38	736	30,10	8,82	1411
	8	2,10	11,40	0,57	2,33	235,40	0,15	<b>35,99</b>	<b>8,49</b>	33,30	8,64	758	31,30	9,60	1444
	9	2,10	11,40	0,67	2,78	235,40	0,16	<b>36,97</b>	<b>8,45</b>	34,42	8,36	723	35,53	9,09	1355

7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,10	11,40	0,12	0,48	235,40	0,14	<b>33,37</b>	<b>15,18</b>	31,32	11,66	727	28,78	9,77	1513
	5	2,10	11,40	0,24	1,00	235,40	0,13	33,13	16,05	<b>31,55</b>	<b>11,90</b>	689	28,90	9,95	1460
	6	2,10	11,40	0,34	1,40	235,40	0,15	<b>34,19</b>	<b>8,00</b>	31,45	8,12	773	29,72	8,80	1389
	7	2,10	11,40	0,45	1,86	235,40	0,15	<b>34,74</b>	<b>7,66</b>	32,56	7,62	710	30,58	8,73	1361
	8	2,10	11,40	0,56	2,33	235,40	0,15	<b>36,03</b>	<b>8,28</b>	33,63	8,27	751	31,62	9,05	1406

Caudal 60 m <sup>3</sup> /h y Froude 4.35															
Sección	Y	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)	Y <sub>máx</sub> (cm)	% Calado	Y/Y <sub>1</sub>	V <sub>1</sub> (cm/s)	Serie original		Primer filtrado			Segundo filtrado		
								V/V <sub>1</sub>	V <sub>m</sub> original	Desviación Estándar original	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)	Nº Spikes total	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,50	14,21	0,21	0,40	215,70	0,37	79,71	52,40	77,79	38,11	582	<b>79,10</b>	<b>35,53</b>	1395
	5	2,50	14,21	0,43	0,84	215,70	0,31	74,40	53,83	73,32	39,49	565	<b>67,71</b>	<b>31,21</b>	1343
	6	2,50	14,21	0,60	1,17	215,70	0,21	51,54	55,18	49,87	40,01	577	<b>45,66</b>	<b>30,15</b>	1375
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,50	14,21	0,15	0,40	215,70	0,36	79,71	52,40	77,79	38,11	582	<b>78,72</b>	<b>27,98</b>	1431
	5	2,50	14,21	0,30	0,84	215,70	0,40	97,05	40,52	93,65	31,99	669	<b>86,68</b>	<b>28,03</b>	1444
	6	2,50	14,21	0,42	1,17	215,70	0,23	57,17	49,42	54,22	35,95	687	<b>49,57</b>	<b>27,05</b>	1504
	7	2,50	14,21	0,57	1,56	215,70	0,15	41,48	46,98	37,02	34,57	690	<b>33,20</b>	<b>25,86</b>	1486
	8	2,50	14,21	0,71	1,96	215,70	0,08	22,48	44,28	18,92	31,77	699	<b>16,29</b>	<b>22,66</b>	1532
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,50	14,21	0,13	0,40	215,70	0,27	65,62	37,76	62,92	29,01	682	<b>58,67</b>	<b>23,48</b>	1445
	5	2,50	14,21	0,27	0,84	215,70	0,22	49,40	31,15	<b>46,42</b>	<b>23,85</b>	659	42,41	19,23	1410
	6	2,50	14,21	0,38	1,17	215,70	0,20	51,17	39,45	47,05	28,54	705	<b>42,18</b>	<b>22,02</b>	1492
	7	2,50	14,21	0,50	1,56	215,70	0,16	42,02	38,10	38,50	27,64	670	<b>34,95</b>	<b>20,98</b>	1458
	8	2,50	14,21	0,63	1,96	215,70	0,11	12,09	15,28	26,54	25,97	700	<b>23,16</b>	<b>19,26</b>	1490
	9	2,50	14,21	0,75	2,33	215,70	0,08	12,11	15,99	20,58	25,87	684	<b>18,01</b>	<b>18,86</b>	1491
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,50	14,21	0,11	0,40	215,70	0,23	52,38	32,80	<b>49,40</b>	<b>24,94</b>	685	45,42	20,07	1439
	5	2,50	14,21	0,22	0,84	215,70	0,22	49,40	31,15	<b>46,42</b>	<b>23,85</b>	659	42,41	19,23	1410
	6	2,50	14,21	0,31	1,17	215,70	0,21	48,04	30,78	<b>44,48</b>	<b>23,29</b>	631	39,88	18,64	1423
	7	2,50	14,21	0,41	1,56	215,70	0,18	42,23	29,12	<b>38,68</b>	<b>21,99</b>	632	34,58	17,55	1397
	8	2,50	14,21	0,51	1,96	215,70	0,16	38,29	29,97	<b>34,93</b>	<b>21,93</b>	660	31,21	17,15	1429
	9	2,50	14,21	0,61	2,33	215,70	0,13	31,55	29,61	<b>28,53</b>	<b>21,47</b>	639	25,35	16,51	1418
	10	2,50	14,21	0,70	2,70	215,70	0,11	25,98	29,23	<b>22,70</b>	<b>20,93</b>	674	19,75	15,48	1487
5	11	2,50	14,21	0,79	3,04	215,70	0,09	21,94	26,42	<b>18,99</b>	<b>18,77</b>	707	16,16	13,88	1507
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	4	2,50	14,21	0,10	0,40	215,70	0,17	39,92	24,03	<b>36,67</b>	<b>18,59</b>	679	33,04	14,95	1436
	5	2,50	14,21	0,21	0,84	215,70	0,18	1,91	8,30	<b>38,27</b>	<b>20,08</b>	699	34,89	16,17	1468
	6	2,50	14,21	0,30	1,17	215,70	0,17	3,24	9,51	<b>36,69</b>	<b>17,67</b>	583	33,09	14,66	1324
	7	2,50	14,21	0,40	1,56	215,70	0,17	39,47	21,79	<b>36,27</b>	<b>17,07</b>	598	32,68	14,21	1353
	8	2,50	14,21	0,50	1,96	215,70	0,15	36,16	21,29	<b>32,63</b>	<b>16,26</b>	611	29,02	13,09	1378
	9	2,50	14,21	0,59	2,33	215,70	0,14	34,06	20,77	<b>30,92</b>	<b>16,02</b>	665	27,78	12,96	1444
	10	2,50	14,21	0,69	2,70	215,70	0,13	34,06	20,77	<b>27,47</b>	<b>17,43</b>	622	24,19	13,55	1418
	11	2,50	14,21	0,78	3,04	215,70	0,12	29,71	20,05	<b>26,34</b>	<b>15,08</b>	667	23,46	12,08	1430
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,50	14,21	0,10	0,40	215,70	0,15	35,27	21,75	<b>33,00</b>	<b>16,30</b>	691	29,94	13,18	1455
	5	2,50	14,21	0,21	0,84	215,70	0,15	35,02	21,79	<b>32,66</b>	<b>16,30</b>	688	29,82	13,00	1468
	6	2,50	14,21	0,30	1,17	215,70	0,15	35,49	15,60	<b>32,74</b>	<b>12,53</b>	608	29,73	10,75	1333
	7	2,50	14,21	0,40	1,56	215,70	0,15	35,33	15,74	<b>32,23</b>	<b>12,82</b>	678	29,30	10,97	1438
	8	2,50	14,21	0,50	1,96	215,70	0,14	34,49	15,19	<b>31,04</b>	<b>12,09</b>	649	28,34	10,42	1375
	9	2,50	14,21	0,59	2,33	215,70	0,14	33,92	15,37	<b>31,06</b>	<b>12,03</b>	642	28,09	10,19	1395
	10	2,50	14,21	0,69	2,70	215,70	0,14	32,78	14,54	<b>30,47</b>	<b>12,82</b>	704	27,52	10,54	1444
	11	2,50	14,21	0,77	3,04	215,70	0,14	33,44	17,21	<b>29,95</b>	<b>11,51</b>	670	27,11	9,66	1433

Caudal 67.4 m <sup>3</sup> /h y Froude 5.74															
Sección	Y	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)	Y <sub>máx</sub> (cm)	% Calado	Y/Y <sub>1</sub>	V <sub>1</sub> (cm/s)	Serie original		Primer filtrado			Segundo filtrado		
								V/V <sub>1</sub>	V <sub>m</sub> original	Desviación Estándar original	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)	Nº Spikes total	V <sub>m</sub> (cm/s)	Desviación Estándar (cm/s)
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,25	17,16	0,17	0,45	269,30	0,27	73,17	93,67	77,50	60,98	675	<b>71,81</b>	<b>44,37</b>	1455
	5	2,25	17,16	0,35	0,93	269,30	0,19	52,20	87,73	55,79	56,55	639	<b>50,94</b>	<b>39,71</b>	1430
	6	2,25	17,16	0,50	1,30	269,30	0,13	37,94	79,86	38,66	50,96	652	<b>34,73</b>	<b>35,07</b>	1454
	7	2,25	17,16	0,66	1,74	269,30	0,05	17,88	69,30	16,55	45,97	604	<b>14,40</b>	<b>31,71</b>	1404
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,25	17,16	0,14	0,45	269,30	0,24	73,14	44,54	70,36	33,72	655	<b>65,00</b>	<b>27,07</b>	1433
	5	2,25	17,16	0,29	0,93	269,30	0,23	68,87	45,53	66,03	34,15	658	<b>60,59</b>	<b>27,05</b>	1459
	6	2,25	17,16	0,41	1,30	269,30	0,19	59,70	46,93	56,45	34,25	717	<b>50,75</b>	<b>26,23</b>	1513
	7	2,25	17,16	0,55	1,74	269,30	0,16	51,53	48,70	48,35	35,88	617	<b>44,21</b>	<b>27,49</b>	1415
	8	2,25	17,16	0,69	2,18	269,30	0,13	44,14	43,16	40,21	31,98	667	<b>35,74</b>	<b>24,20</b>	1469
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,25	17,16	0,11	0,45	269,30	0,16	47,93	31,15	<b>44,26</b>	<b>23,45</b>	625	40,06	18,94	1354
	5	2,25	17,16	0,23	0,93	269,30	0,17	49,59	32,41	<b>46,18</b>	<b>24,49</b>	658	41,87	19,35	1432
	6	2,25	17,16	0,33	1,30	269,30	0,16	47,45	28,95	<b>43,85</b>	<b>22,02</b>	638	39,43	17,72	1399
	7	2,25	17,16	0,44	1,74	269,30	0,16	47,11	29,53	<b>42,82</b>	<b>21,64</b>	670	38,23	16,97	1471

	8	2,25	17,16	0,55	2,18	269,30	0,15	45,26	29,47	<b>41,61</b>	<b>21,80</b>	657	37,17	17,10	1425
	9	2,25	17,16	0,65	2,59	269,30	0,15	44,45	29,32	<b>41,22</b>	<b>21,75</b>	652	37,03	17,06	1468
	10	2,25	17,16	0,75	3,00	269,30	0,14	40,10	30,88	<b>37,04</b>	<b>22,53</b>	696	33,51	17,32	1469
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,25	17,16	0,11	0,45	269,30	0,12	33,55	26,45	<b>32,01</b>	<b>19,29</b>	641	29,42	14,89	1427
	5	2,25	17,16	0,23	0,93	269,30	0,16	49,59	32,41	46,18	24,49	658	<b>41,87</b>	<b>19,35</b>	1432
	6	2,25	17,16	0,32	1,30	269,30	0,15	47,45	28,95	43,85	22,02	638	<b>39,43</b>	<b>17,72</b>	1399
	7	2,25	17,16	0,42	1,74	269,30	0,13	38,86	17,86	<b>35,14</b>	<b>13,84</b>	650	31,90	11,44	1389
	8	2,25	17,16	0,53	2,18	269,30	0,14	40,90	17,90	<b>37,64</b>	<b>13,99</b>	646	34,30	12,18	1395
	9	2,25	17,16	0,63	2,59	269,30	0,14	40,61	17,75	<b>37,22</b>	<b>13,76</b>	650	34,06	11,71	1391
	10	2,25	17,16	0,73	3,00	269,30	0,13	38,84	20,25	<b>36,12</b>	<b>15,11</b>	647	32,47	12,11	1431
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,25	17,16	0,11	0,45	269,30	0,11	30,67	19,67	<b>29,08</b>	<b>14,71</b>	716	26,71	11,90	1496
	5	2,25	17,16	0,22	0,93	269,30	0,11	31,70	20,63	<b>30,25</b>	<b>15,00</b>	700	27,40	11,80	1511
	6	2,25	17,16	0,31	1,30	269,30	0,13	<b>34,12</b>	<b>11,94</b>	31,32	10,11	754	29,01	9,26	1415
	7	2,25	17,16	0,42	1,74	269,30	0,13	<b>34,78</b>	<b>11,79</b>	31,78	9,96	729	29,41	9,18	1389
	8	2,25	17,16	0,52	2,18	269,30	0,14	<b>37,07</b>	<b>11,80</b>	33,79	10,48	749	31,36	9,87	1441
	9	2,25	17,16	0,62	2,59	269,30	0,14	<b>37,18</b>	<b>13,20</b>	34,13	11,02	694	31,44	10,15	1413
	10	2,25	17,16	0,72	3,00	269,30	0,14	<b>38,10</b>	<b>12,82</b>	35,10	10,63	684	32,61	9,95	1396
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,25	17,16	0,10	0,45	269,30	0,11	<b>30,75</b>	<b>12,53</b>	28,98	9,74	716	26,58	8,95	1495
	5	2,25	17,16	0,21	0,93	269,30	0,12	31,39	27,58	<b>29,14</b>	<b>20,15</b>	707	26,34	15,05	1518
	6	2,25	17,16	0,30	1,30	269,30	0,12	<b>32,93</b>	<b>9,13</b>	30,48	8,44	738	28,54	8,51	1394
	7	2,25	17,16	0,40	1,74	269,30	0,12	<b>33,05</b>	<b>9,25</b>	30,50	8,54	740	28,42	8,64	1410
	8	2,25	17,16	0,50	2,18	269,30	0,13	<b>34,44</b>	<b>9,23</b>	32,22	8,41	732	30,05	8,67	1419
	9	2,25	17,16	0,60	2,59	269,30	0,13	<b>34,81</b>	<b>9,22</b>	32,32	8,83	734	30,30	9,28	1397
	10	2,25	17,16	0,69	3,00	269,30	0,14	<b>36,57</b>	<b>9,19</b>	33,90	8,68	764	30,02	9,42	2150
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2,25	17,16	0,10	0,45	269,30	0,10	28,42	22,37	<b>26,99</b>	<b>16,03</b>	665	24,91	12,13	1456
	5	2,25	17,16	0,21	0,93	269,30	0,11	31,74	33,05	<b>30,56</b>	<b>23,71</b>	699	27,76	17,46	1498
	6	2,25	17,16	0,30	1,30	269,30	0,12	<b>32,36</b>	<b>7,96</b>	30,21	7,74	714	28,40	8,33	1340
	7	2,25	17,16	0,40	1,74	269,30	0,13	<b>33,72</b>	<b>7,97</b>	31,40	7,94	700	29,60	8,87	1297
	8	2,25	17,16	0,50	2,18	269,30	0,13	<b>33,95</b>	<b>8,15</b>	31,38	8,05	738	29,47	8,68	1381
	9	2,25	17,16	0,60	2,59	269,30	0,13	<b>35,35</b>	<b>8,08</b>	32,69	8,31	720	30,85	9,08	1378
	10	2,25	17,16	0,69	3,00	269,30	0,13	<b>36,12</b>	<b>8,00</b>	33,53	7,92	742	29,97	10,06	2089

