UNIVERSIDAD DE GRANADA

Programa de Doctorado en Ingeniería Civil Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica



EXPERIMENTACIÓN FÍSICA Y NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA LOCAL DE REJAS DE FONDO TRANSVERSALES AL FLUJO EN CAPTACIONES DE AGUA SUPERFICIAL.

EDUARDO FERNANDO CARRIÓN CORONEL

TESIS DOCTORAL PARA LA OBTENCIÓN DE GRADO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

Directores:

DR. PABLO ORTIZ ROSSINI DR. LEONARDO NANÍA ESCOBAR

GRANADA, JUNIO 2022

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales Autor: Eduardo Carrión Coronel ISBN: 978-84-1117-574-6 URI: <u>https://hdl.handle.net/10481/77694</u>

INDICE

CAPÍTL	ILO 1	I: INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Cor	ntexto del estudio	1
1.2.	Esta	ado del arte	5
1.2	.1.	Captaciones de fondo	5
1.2	.2.	Clasificación de las rejas de fondo	5
1.2	.3.	Dimensionamiento de la reja de fondo	6
1.2	.4.	Diseño hidráulico de la reja de fondo	7
1.2	.5.	Caudal capturado por una reja de fondo	8
1.2	.6.	Perfil del flujo sobre una reja de fondo	10
1.2	.7.	Coeficiente de descarga y perfil de las barras de la reja de fondo	11
1.2	.8.	Influencia de la inclinación de la reja	16
1.2	.9.	Distribución de velocidades y presiones sobre la reja	16
1.2	.10.	Presencia de sedimentos en el diseño de rejas de captación de fondo.	20
1.2	.11.	Rejas de fondo con barras transversales al flujo	25
1.2	.12.	Reja de efecto Coanda	27
1.2 (CF	.13. D).	Estudio de rejas de fondo con Dinámica Computacional de Fluidos 36	
1.3.	Obj	etivos	49
1.4.	Estr	ructura de la tesis	50
CAPÍTL	ILO 2	2: METODOLOGÍA	51
2.1.	EXF	PERIMENTACIÓN FÍSICA	52
2.1	.1.	Dispositivo de laboratorio	52
2.1	.2.	Rejas	53
2.1	.3.	Desarrollo de experimentos	56
2.1	.4.	Pruebas de laboratorio con agua limpia	56
2.1	.5.	Pruebas de laboratorio con agua y sedimento	60
2.1	.6.	Pruebas con sedimento separado	62
2.1	.7.	Pruebas con sedimento mezclado	63
2.2.	EXF	PERIMENTACIÓN NUMÉRICA	65
2.2	.1.	Geometría	71
2.2	.2.	Discretización	78
2.2	.3.	Condiciones de cálculo	85
2.2	.4.	Métodos de resolución numérica	91
2.2	.5.	Validación	93

	2.2.6.	Estudio paramétrico CFD 2D	94
CAF	PÍTULO 3	RESULTADOS	99
3.	.1. EXF	PERIMENTACIÓN FÍSICA 1	00
	3.1.1.	Experimentos con agua limpia1	00
	3.1.2.	Experimentos con agua y sedimento1	02
	3.1.3.	Relación sedimento/caudal capturado 1	07
	3.1.4. función d	Variación de la eficiencia de la reja de barras de sección circular en del diámetro de barra1	10
3.	.2. EXF	PERIMENTACIÓN NUMÉRICA 1	14
	3.2.1.	Validación de la simulación1	14
	3.2.2. simulacio	Comparación del caudal obtenido con datos experimentales vs ón numérica1	19
	3.2.3.	Estudio paramétrico CFD 2D 1	22
CAF	PÍTULO 4	CONCLUSIONES 1	71
5.	BIBLIOG	GRAFÍA1	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Características y disposición típica de una estructura con reja de efecto Coanda; y b) detalle de la geometría de las barras y variables clave. [6]3
Figura 1.2. (a) Reja con barras paralelas al flujo; (b) Reja con barras transversales al flujo
Figura 1.3. Esquema de una abertura de reja de ancho b1 y definición del índice huecos9
Figura 1.4. Esquema de reja (a) línea de energía paralela al fondo del canal (b) línea de energía horizontal, adaptado de [21]11
Figura 1.5. Tipos de barras para captaciones de fondo
Figura 1.6. Inclinación y separación de los barras [60]29
Figura 1.7. Características, disposición típica, y parámetros de diseño para rejas de efecto Coanda [60]
Figura 1.8. Vista de cerca de los barras y sus parámetros [63]
Figura 1.9. Flujo idealizado sobre una ranura de la reja [63]
Figura 1.10. Geometría del dominio del fluido
Figura 1.11. Perfiles de caudal sobre el centro de la barra con reja horizontal [70]37
Figura 1.12: Perfiles de flujo sobre el centro de la barra con reja horizontal[71]
Figura 1.13. Capacidad de derivación del sistema de admisión [71]38
Figura 1.14. Capacidad de derivación del sistema de toma considerando diferentes concentraciones de sedimento
Figura 1.15. Perfiles de flujo longitudinales para diferentes caudales, pendiente de reja 20%, m = 0.60. [72]
Figura 1.16. Perfiles de flujo longitudinales con agua limpia y 5% de concentración de sedimentos, para q = 1.36 m ³ /s/m, pendiente del 20 % y m = 0.23 [72]
Figura 1.17: Secciones transversales de los perfiles ensayados [73]42
Figura 1.18. Perfil de flujo sobre la reja con 30% de pendiente longitudinal [69]43
Figura 1.19. Capacidad de derivación para una reja con pendiente longitudinal de 30% [69]44
Figura 1.20. Esquema en planta del modelo físico construido [74]45
Figura 1.21. Esquemas de la longitud Lw cuando (a) el flujo ingresa directamente a la galería de captación, y (b) el flujo continúa por el canal hacia una galería de captación [74]
Figura 1.22. Ejemplo de secciones de flujo adherido a la parte inferior de las barras de la reja [74]47
Figura 1.23. Configuración de la malla para realizar la modelación numérica: (a) vista en planta; y (b) sección transversal [74]47
Figura 2.1. Dispositivo de laboratorio53
Figura 2.2. Imagen de rejas utilizadas y características geométricas de sus barras 54

Figura 2.3. Imagen de rejas con barras circulares de 6.3mm (izquierda) y 3mm (derecha)
Figura 2.4. Esquema de funcionamiento del modelo físico trabajando con agua limpia
Figura 2.5. Imagen de flujo de agua limpia sobre reja de barra triangular
Figura 2.6. Imagen de flujo de agua limpia capturado por reja de barra triangular 58
Figura 2.7. Imagen de reja de barra circular instalada en el canal de laboratorio59
Figura 2.8. Imagen de flujo de agua limpia sobre reja de barra circular
Figura 2.9. Imagen de flujo de agua limpia captado por reja de barra circular60
Figura 2.10. Esquema de funcionamiento del modelo físico para las pruebas de agua y sedimento
Figura 2.11. Serie de tamices utilizados (a), peso de sedimento (b)61
Figura 2.12. Sistema para incorporación de sedimento (a) tolva y válvula, (b) muestra de sedimento
Figura 2.13. Dominio extraído de prototipo utilizado en [68], (a) Geometría de vertedero y canal, inclinación 26.3°; (b) reja Coanda A5
Figura 2.14. Variables geométricas reja de barra triangular
Figura 2.15. Dominios de vertedero y canal extraídos de prototipo de laboratorio: (a) 20°; (b) 35°; (c) 45°
Figura 2.16. Geometría de reja de barras de sección triangular de 5mm de ancho, separación entre barras 2mm: (a) 20°; (b) 35°; (c) 45°76
Figura 2.17. Geometría de reja de barras de sección circular de 5mm de diámetro, separación entre barras 2mm: (a) 20°; (b) 35°; (c) 45°78
Figura 2.18. Malla del vertedero y canal, (a) malla general, (b) detalle de malla en la zona del vertedero; (c) detalle de malla en la zona cerca de la pared del canal
Figura 2.19. Mallas de rejas, (a-b) barras de sección triangular; (c-d) barras de sección circular
Figura 2.20. Evaluación de la calidad de mallado con el criterio de oblicuidad
Figura 2.21. Condiciones de borde [83]85
Figura 2.22. Condiciones de contorno aplicadas en el canal
Figura 2.23 (a). Condiciones de contorno aplicadas en la reja de barras de sección triangular
Figura 2.23 (b). Condiciones de contorno aplicadas en las barras de sección triangular
Figura 2.24 (a). Condiciones de contorno aplicadas en la reja de barras de sección circular
Figura 2.24 (b). Condiciones de contorno aplicadas en las barras de sección circular 90
Figura 3.1. Gráfico de flujo de agua limpia capturado por las rejas de barras de sección triangular, circular y semicircular
Figura 3.2. Gráfico de sedimento excluido por la reja de barras de sección triangular

Figura 3.3. Gráfico de sedimento excluido por la reja de barras de sección circular . 104
Figura 3.4. Gráfico de sedimento excluido por la reja de barras de sección semicircular
Figura 3.5. Gráfico de porcentaje promedio de sedimento excluido
Figura 3.7. Gráfica de sedimento captado por rejas de barras de sección circular de diferentes diámetros, utilizando sedimento mezclado
Figura 3.8. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal de la reja prototipo A5, contornos de fracción de volumen fases agua-aire
Figura 3.9. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal de la reja prototipo A5, contornos de velocidad115
Figura 3.10. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal de la reja prototipo A5, residuales de convergencia116
Figura 3.11. Resultados de la simulación numérica de flujo de agua limpia sobre la reja prototipo A5 (a) contornos de fracción de volumen, fases agua-aire: (b) contornos de presión; (d) contornos de velocidad
Figura 3.12. Resultados de simulación CFD de reja de barra de sección triangular; (a) fracción de contorno de volumen; (b) vectores de velocidad y contornos de presión.120
Figura 3.13. Resultados de simulación CFD de reja de barra circular; (a) fracción de volumen de contorno de dos fases; (b) vectores de contornos de velocidad y presión.
Figura 3.14. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal del dispositivo de laboratorio a 20°; (a) contornos de fracción de volumen, fases agua- aire; (b) contornos de velocidad;
Figura 3.15. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal del dispositivo de laboratorio a 35°; (a) contornos de fracción de volumen, fases agua- aire; (b) contornos de velocidad;
Figura 3.16. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal del dispositivo de laboratorio a 45°; (a) contornos de fracción de volumen, fases agua- aire; (b) contornos de velocidad125
Figura 3.17. Resultados CFD reja de barras de sección triangular, ancho 5mm; separación 2mm; zona alta; (a) contornos de fracción de volumen de las fases agua- aire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión
Figura 3.18. Resultados CFD reja de barras de sección triangular, ancho 5mm; separación 2mm; zona media; (a) contornos de fracción de volumen de las fases agua- aire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión
Figura 3.19. Resultados CFD reja de barras de sección triangular, ancho 5mm; separación 2mm; zona baja; (a) contornos de fracción de volumen de las fases agua- aire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión
Figura 3.20. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección triangular, θ = 20°; ancho de barra 5mm; separación 2mm
Figura 3.21. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección triangular, θ = 35°; w=5mm; s=2mm134

Figura 3.22. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección triangular, θ = 45°; w=5mm; s=2mm135
Figura 3.23. Relaciones entre $\Delta q/Q1$ y número de Froude para rejas de barras de sección triangular
Figura 3.24. Relaciones entre $\Delta q/q1$ y número de Reynolds para rejas de barras de sección triangular
Figura 3.25. Resultados CFD reja circular diámetro 5mm; separación 2mm; zona alta; (a) contornos de fracción de volumen de las fases agua-aire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión
Figura 3.26. Resultados CFD reja circular diámetro 5mm; separación 2mm; zona media; (a) contornos de fracción de volumen de las fases agua-aire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión
Figura 3.27. Resultados CFD reja circular diámetro 5mm; separación 2mm; zona baja; (a) contornos de fracción de volumen de las fases agua-aire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión
Figura 3.28. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección circular, θ = 20°; diámetro 5mm; separación 2mm
Figura 3.29. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección circular, θ = 35°; diámetro 5mm; separación 2mm
Figura 3.30. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección triangular, θ = 45°; diámetro 5mm; separación 2mm
Figura 3.31. Relaciones entre Δq/Q1 y número de Froude para rejas de barras de sección circular de 2mm de diámetro163
Figura 3.32. Relaciones entre Δq/Q1 y número de Froude para rejas de barras de sección circular de 1mm de diámetro164
Figura 3.33. Relaciones entre $\Delta q/Q1$ y número de Froude para rejas de barras de sección circular
Figura 3.34. Relaciones entre Δq/Q1 y número de Reynolds para rejas de barras de sección circular de 1mm de diámetro166
Figura 3.35. Relaciones entre Δq/Q1 y número de Reynolds para rejas de barras de sección circular de 2mm de diámetro167
Figura 3.36. Relaciones entre $\Delta q/Q1$ y número de Reynolds para rejas de barras de sección circular

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Resumen de ecuaciones para calcular el flujo de descarga a través de unareja de fondo longitudinal
Tabla 1.2. Parámetros para la modelación numérica [70] 37
Tabla 2.1: Características geométricas de las rejas de efecto Coanda utilizadas54
Tabla 2.2. Características geométricas rejas de barra circular
Tabla 2.3. Matriz de ensayos de laboratorio con agua limpia
Tabla 2.4. Matriz de pruebas de laboratorio con sedimento separado para las rejas debarras de sección triangular, circular y semicircular
Tabla 2.5. Matriz de pruebas de laboratorio con sedimento mezclado para la reja debarras de sección circular con diferentes diámetros
Tabla 2.6. Características geométricas prototipo reja A5 [68] 72
Tabla 2.7. Características geométricas de rejas de barras de sección triangular74
Tabla 2.8. Características geométricas de rejas de barras de sección circular
Tabla 2.9: Valores de oblicuidad y calidad de elementos
Tabla 2.10 Propiedades de los fluidos
Tabla 2.11 Condiciones de borde aplicadas. 87
Tabla 2.12. Esquemas numéricos y métodos de solución. [83]
Tabla 2.13. Características y condiciones de prototipo A5
Tabla 2.14. Matriz de casos de estudio paramétrico CFD – 2D
Tabla 3.1. Resultados de pruebas de laboratorio con agua limpia 100
Tabla 3.2. Resultados de laboratorio con sedimento separado reja con barras desección triangular
Tabla 3.3. Resultados de laboratorio con sedimento separado reja con barras desección circular
Tabla 3.4. Resultados de laboratorio con sedimento separado reja con barras desección
Tabla 3.5. Resultados de laboratorio, relación entre sedimento y caudal de aguacapturado por la reja con barras de sección triangular
Tabla 3.6. Resultados de laboratorio, relación entre sedimento y caudal de aguacapturado por la reja con barras de sección circular.108
Tabla 3.7. Resultados de laboratorio, relación entre sedimento y caudal de aguacapturado, reja con barras de sección semi circular
Tabla 3.8. Resultados de laboratorio de agua con sedimento con reja de barras desección circular, diámetro 5mm.111
Tabla 3.9. Resultados de laboratorio de agua con sedimento con reja de barras desección circular, diámetro 6.3mm
Tabla 3.10. Resultados de laboratorio de agua con sedimento con reja de barras desección circular, diámetro 3mm.112

Tabla 3.11. Independencia de malla para prototipo A5 117
Tabla 3.12. Caudal obtenido con datos experimentales vs. Caudal obtenido mediantesimulación numérica.119
Tabla 3.13. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección triangular, ancho 3mm, separación 1mm127
Tabla 3.14. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección triangular, ancho 5mm, separación 1mm127
Tabla 3.15. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección triangular, ancho 6.3mm, separación 1mm128
Tabla 3.16. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarra de sección triangular, ancho 3mm, separación 2mm128
Tabla 3.17. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarra de sección triangular, ancho 5mm, separación 2mm129
Tabla 3.18. Resultados de caudales capturados por cada ranura de la reja de barrasde sección triangular, ancho 6.3mm, separación 2mm129
Tabla 3.19. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho debarra 3mm, separación entre barras 1mm137
Tabla 3.20. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho debarra 5mm, separación entre barras 1mm137
Tabla 3.21. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho debarra 6.3mm, separación entre barras 1mm138
Tabla 3.22. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho de barra 3mm, separación entre barras 2mm
Tabla 3.23. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho debarra 5mm, separación entre barras 2mm139
Tabla 3.24. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho debarra 6.3mm, separación entre barras 2mm139
Tabla 3.25. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 3mm, separación 1mm
Tabla 3.26. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 5mm, separación 1mm
Tabla 3.27. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 6.3mm, separación 1mm
Tabla 3.28. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 10mm, separación 1mm
Tabla 3.29. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 12mm, separación 1mm
Tabla 3.30. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 14mm, separación 1mm
Tabla 3.31. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 16mm, separación 1mm
Tabla 3.32. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 20mm, separación 1mm

Tabla 3.33. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 3mm, separación 2mm
Tabla 3.34. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 5mm, separación 2mm
Tabla 3.35. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 6.3mm, separación 2mm
Tabla 3.36. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 10mm, separación 2mm
Tabla 3.37. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 12mm, separación 2mm
Tabla 3.38. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 14mm, separación 2mm
Tabla 3.39. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 16mm, separación 2mm
Tabla 3.40. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja debarras de sección circular, diámetro 20mm, separación 2mm
Tabla 3.41. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular, diámetro 3mm,separación entre barras 1mm157
Tabla 3.42. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular, diámetro 5mm,separación entre barras 1mm157
Tabla 3.43. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro6.3mm, separación entre barras 1mm158
Tabla 3.44. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro10mm,
Tabla 3.45. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro12mm, separación entre barras 1mm158
Tabla 3.46. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro14mm, separación entre barras 1mm159
Tabla 3.47. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro16mm, separación entre barras 1mm159
Tabla 3.48. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro20mm, separación entre barras 1mm159
Tabla 3.49. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 3mm,separación entre barras 2mm160
Tabla 3.50. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 5mm,separación entre barras 2mm160
Tabla 3.51. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro6.3mm, separación entre barras 2mm161
Tabla 3.52. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro10mm, separación entre barras 2mm161
Tabla 3.53. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro12mm, separación entre barras 2mm161

Tabla 3.54. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro14mm, separación entre barras 2mm	162
Tabla 3.55. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro16mm, separación entre barras 2mm	162
Tabla 3.56. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro20mm, separación entre barras 2mm	162

RESUMEN

En todo proyecto de recursos hídricos con fines de uso municipal, agrícola, industrial, producción de energía, etc., es necesario separar del agua una amplia variedad de sólidos. Todos los tipos de captación de agua superficial deben tener la capacidad de excluir del agua los desechos, peces, sedimentos y otros materiales. En los últimos años, ha aumentado la necesidad de una exclusión eficaz de los sólidos presentes en el agua. Los sistemas de riego modernos (p. ej., goteo, aspersores, válvulas, bombas) necesitan un mayor filtrado que el riego por inundación convencional. Se requiere la remoción sedimentos para proyectos de captación de agua a pequeña escala en áreas distantes, especialmente en aquellas que se encuentran en zonas agrestes de difícil acceso que limita o impide realizar las actividades de operación y mantenimiento con regularidad.

Uno de los métodos más utilizados para la captación de agua superficial en ríos de montaña con fuertes pendientes y cauces irregulares con importante transporte de sedimentos y caudales de inundación, son las rejas de fondo. Las rejas están diseñadas para capturar la mayor cantidad de agua posible, evitando la entrada de material sólido. Un tipo de reja de fondo no convencional con barras transversales al flujo que se utiliza con excelentes resultados en la separación sólido líquido en la captación de agua superficial, es la denominada reja de efecto Coanda.

En la presente investigación se estudió de manera experimental y numérica el funcionamiento hidrodinámico local de rejas de fondo con barras transversales al flujo. En la fase experimental se trabajó con agua limpia y con sedimento. En la fase numérica se trabajó con agua limpia. Las características más relevantes de las rejas estudiadas y que las diferencian considerablemente de las rejas de fondo convencionales, son la disposición de las barras respecto al sentido del flujo, la inclinación longitudinal y la separación entre barras. La ranura estándar de una reja de efecto Coanda es de 1mm, en el presente estudio se utilizaron separaciones de 1 y 2mm. El funcionamiento de las rejas consiste en un flujo de agua en régimen supercrítico que pasa sobre barras

xi

dispuestas perpendicularmente a la dirección del flujo. Se utilizó como base la reja de efecto Coanda con barras estándar de sección triangular o tipo cuña. Con fines comparativos y de factibilidad constructiva y económica, se evaluaron dos formas de barra alternativas de sección circular y semicircular. El uso de las rejas está orientado a la captación de agua superficial para consumo en poblaciones rurales menores a 1000 habitantes de países en desarrollo como Ecuador, por tal razón el caudal que se utilizó para todos los experimentos fue de 2.5 L/s.

Para la experimentación física se construyó un prototipo de laboratorio, este consiste en un canal rectangular prismático de pendiente ajustable, las características geométricas del canal son: longitud 2m; ancho 9.3 cm, rango angular de la pendiente de 20° a 45° respecto a la horizontal. El objeto principal fue determinar la eficiencia de las rejas en cuanto a captación de agua limpia, así como a la remoción de sedimento. Los resultados de la experimentación física demuestran que la reja de barras de sección triangular es más eficiente en cuanto a captación de agua limpia, mientras que, en términos de exclusión de sedimento, el mejor rendimiento lo presenta la reja de barras de sección circular.

La experimentación numérica se desarrolla con el uso del código ANSYS FLUENT. Un estudio paramétrico CFD en 2D fue desarrollado para evaluar la influencia sobre el flujo de agua limpia capturado de variables geométricas como la inclinación de la reja, posición de la reja a lo largo del canal (zonas alta, media, baja); forma y ancho de la barra, tamaño de ranura. Se determina la tendencia de los flujos capturados en forma total y para cada ranura de las rejas estudiadas. Se evalúa el rendimiento de cada tipo de reja utilizando parámetros adimensionales relevantes como el número de Froude y el número de Reynolds cuyas longitudes características para su cálculo fueron la profundidad del flujo y la separación entre barras respectivamente. Los experimentos numéricos demuestran que las rejas con barras de sección triangular y circular tienen comportamientos opuestos. Las rejas con barras de sección triangular son más eficientes en términos de flujo capturado a medida que aumentan los números de Froude y de Reynolds, mientras que las rejas de barras de sección circular son más eficientes a medida que las variables adimensionales disminuyen. Los experimentos numéricos con números de Froude y Reynolds iguales, demostraron una mayor eficiencia en las rejas de barras triangulares sobre las de barras circulares de igual tamaño y separación. Se ha demostrado que aumentar el diámetro de las barras mejora la eficiencia del flujo capturado a un nivel similar al de las rejas de barras triangulares.

ABSTRACT

In any water resources project for municipal, agricultural, industrial, energy production, etc. purposes, it is necessary to separate a wide variety of solids from the water. All types of surface water intake must have the ability to exclude debris, fish, sediment, and other materials from the water. In recent years, the need for effective exclusion of solids present in water has increased. Modern irrigation systems (eg., drip, sprinklers, valves, pumps) require more filtration than conventional flood irrigation. Sediment removal is required for small-scale water harvesting projects in remote areas, especially those located in rugged areas with difficult access that limits or prevents regular operation and maintenance activities.

One of the most widely used methods for capturing surface water in mountain rivers with steep slopes and irregular channels with significant sediment transport and flood flows, are bottom bars. The bars are designed to capture as much water as possible, preventing the entry of solid material. A type of non-conventional bottom screen with bars transverse to the flow that is used with excellent results in solid-liquid separation in surface water intake is the so-called Coanda effect screen.

In the present research, the local hydrodynamic behavior of bottom racks with transverse bars to the flow was studied experimentally and numerically. In the experimental phase, clean water and sediment were used. In the numerical phase, clean water was used. The most relevant characteristics of the screens studied and that differ considerably from conventional bottom racks, are the arrangement of the bars with respect to the flow direction, the longitudinal inclination and the separation between bars. The standard slot of a Coanda effect screen is 1mm, in the present study 1 and 2mm separations were used. The operation of the bars consists of a flow of water in a supercritical regime that passes over bars arranged perpendicular to the direction of the flow. The Coanda effect screen with standard triangular or wedge-type bars was used as a base. For

comparative, constructive and economic feasibility purposes, two alternative bar shapes with circular and semicircular sections were evaluated. The use of the bars is oriented to the capture of surface water for consumption in rural populations of less than 1000 inhabitants of developing countries such as Ecuador, for this reason the flow rate used for all the experiments was 2.5 L/s.

For the physical experimentation, a laboratory prototype was built. This consists of a prismatic rectangular channel with an adjustable slope, and the geometric characteristics of the channel are: length 2m; width 9.3 cm, angular range of the slope from 20° to 45° with respect to the horizontal. The main objective was to determine the efficiency of the racks in terms of capturing clean water, as well as the removal of sediment. The results of the physical experimentation show that the triangular section bar rack is more efficient in terms of capturing clean water, while, in terms of sediment exclusion, the circular section bar rack presents the best performance.

The numerical experimentation is developed with the use of the ANSYS FLUENT code. A 2D CFD parametric study was developed to evaluate the influence on the flow of clean water captured by geometric variables such as the inclination of the screen, position of the screen along the channel (top, middle, bottom zones); bar shape and width, slot size. Total flows captured and flows for each slot of the rack were calculated. The performance of each type of rack is evaluated using relevant dimensionless parameters such as the Froude number and the Reynolds number, whose characteristic lengths for their calculation were the depth of the flow and the separation between bars, respectively. Numerical experiments show that racks with triangular and circular section bars have opposite behaviors. Triangular section bar rack is more efficient in terms of captured flow as the Froude and Reynolds numbers increase, while circular section bar rack is more efficient as the dimensionless variables decrease. Numerical experiments with equal Froude and Reynolds numbers showed greater efficiency in racks made of triangular bars over those made of circular bars of equal size and spacing. Increasing the diameter of the bars improve the efficiency of the captured flow to a level similar to that of triangular bar screens.

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar dando gracias a Dios por colocarme en este camino y permitirme cumplir esta meta con salud y bienestar.

Expreso mi profundo y sincero sentimiento de gratitud al Profesor Dr. Pablo Ortiz Rossini por brindarme la oportunidad de trabajar bajo su tutela y dirección. Gracias a sus conocimientos, apoyo, paciencia, dedicación, disponibilidad y aliento desde el primer día, ha sido posible la culminación de esta tesis. De igual manera agradezco de sobremanera al Profesor Dr. Leonardo Nanía por su invaluable e inmensa ayuda en el desarrollo de la investigación.

Mi profundo agradecimiento a mis padres, hermanas y hermanos por su apoyo incondicional. Mi gratitud especial a mi hermano Juan Diego por su ayuda en la experimentación física. A mi amor Verónica por comprenderme y apoyarme, con ella todo es posible. Gracias a mi amigo y compañero Edgar, sus consejos y palabras de aliento fueron fundamentales.

Agradezco a la Universidad Técnica Particular de Loja – Ecuador por la confianza y la beca otorgada que me ha permitido cursar el programa de doctorado.

Finalmente agradezco a mis amigos Juan Calos, Byron y Tafa, reunirse con ellos y compartir momentos de alegría fue imprescindible para continuar.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto del estudio

En este capítulo se presenta un contexto del tema de estudio junto con una recopilación de investigaciones relevantes relacionadas con las rejas de fondo. Una de las necesidades básicas más importantes y prioritarias en poblaciones asentadas en zonas con características geográficas, topográficas e hidrológicas especiales, es la dotación y abastecimiento de agua. Esta necesidad ha centrado la atención de varios investigadores quienes han desarrollado estudios sobre sistemas de captación con rejas de fondo desde que apareció la primera estructura de este tipo en Borjome (Cáucaso) en 1898 [1].

La captación de agua superficial para fines de consumo, riego o generación hidroeléctrica puede realizarse a través de diversas estructuras, cuya selección depende de las condiciones geográficas, factores hidráulicos, concentración de sedimentos del río y condiciones económicas. Según la referencia [2], los tipos de estructuras de captación de agua superficial se pueden clasificar principalmente de la siguiente manera:

- 1) Laterales
- 2) Frontales
- 3) De fondo

El objeto de investigación de la presente tesis es la captación con rejas de fondo, también conocida como captación sumergida, tirolesa o caucasiana. El estudio se enfoca específicamente en la hidrodinámica local del flujo sobre la reja; otros componentes de igual importancia como el canal de recogida o el vertedero, no son objeto de la investigación.

1

La captación de agua superficial con rejas de fondo es uno de los métodos más utilizados, especialmente en ríos de montaña con fuertes pendientes y cauces irregulares con importante transporte de sedimentos y caudales de inundación. Las rejas están diseñadas para capturar la mayor cantidad de agua posible y evitando la entrada de material sólido. Respecto a la dirección del flujo, las barras que componen una reja de fondo pueden ser paralelas o perpendiculares, la sección transversal de las barras es generalmente rectangular o circular. Sin embargo, también se utilizan barras con diversas formas geométricas. Al tratarse de una estructura relevante dentro del campo de la Ingeniería Hidráulica, el problema de diseñar correctamente el área mínima necesaria para derivar el caudal requerido y remover la mayor cantidad de sedimentos posible ha llamado la atención de varios investigadores que han estudiado el problema tanto teórica como experimentalmente.

En su mayor parte, las investigaciones referentes a tomas con rejas de fondo se han centrado en aquellas que están formadas por barras dispuestas de forma paralela a la dirección del flujo. Existe abundante literatura técnica sobre procedimientos de cálculo y diseño. En consecuencia, se utilizan con mayor frecuencia [3]–[5]. Estudios detallados sobre rejas de fondo con barras transversales al flujo son limitados en la literatura técnica.

Todos los tipos de captación de agua superficial deben tener la capacidad de separar del agua los desechos, peces, sedimentos y otros materiales. En los últimos años, la demanda de una separación eficaz de los desechos ha aumentado con la necesidad de una eliminación óptima. Los sistemas de riego modernos (p. ej., goteo, aspersores, válvulas, bombas) necesitan un mayor filtrado que el riego por inundación convencional. Se requiere la remoción de peces, sedimentos y escombros finos para proyectos de captación de agua a pequeña escala en áreas distantes, especialmente en aquellas que se encuentran en zonas agrestes de difícil acceso que limita o impide realizar las actividades de operación y mantenimiento con regularidad. Estas estructuras combinan cribado de alta capacidad, aptitudes de autolimpieza y eliminación de escombros finos, todo accionado por gravedad y sin necesidad de electricidad, como se describe en [6].

En la actualidad, muchas de las dificultades de cribado se resuelven utilizando las denominadas rejas con efecto Coanda. Desde la década de 1980, las rejas de efecto Coanda se han utilizado para filtrar desechos orgánicos, basura, limo y organismos acuáticos de varias tomas de agua [7], [8]. El funcionamiento de las rejas consiste en la separación de los sólidos presentes en un flujo de agua supercrítica que pasa sobre

barras en forma de cuña dispuestos perpendicularmente a la dirección del flujo. La figura 1.1 es una representación esquemática de una estructura típica de reja con efecto Coanda.



Figura 1.1. Características y disposición típica de una estructura con reja de efecto Coanda; y b) detalle de la geometría de las barras y variables clave. [6]

Las rejas de efecto Coanda son estructuras patentadas [7], por lo que generalmente su fabricación es de tipo industrial, y su disponibilidad comercial en países en desarrollo como Ecuador es limitada. Para el correcto funcionamiento hidráulico, las variables geométricas de las barras deben construirse con gran precisión, especialmente la separación y el desfase angular, por lo que la fabricación manual es muy compleja y relativamente costosa. Los sistemas convencionales de captación de aguas superficiales utilizan generalmente barras de secciones regulares (circulares, cuadradas) que se disponen paralelas al flujo. Este tipo de barras tienen una alta disponibilidad comercial.

A efectos prácticos y de facilidad de construcción, se propone una alternativa a la reja de efecto Coanda con barras de sección circular, especialmente para pequeñas tomas de agua en poblaciones rurales de menos de 1000 habitantes. En consecuencia, se evaluó experimental y numéricamente el funcionamiento hidráulico de una reja de efecto Coanda convencional (barra triangular o tipo cuña) y una reja Coanda con barras circulares con anchos y espaciamientos de barra similares. La experimentación física se realizó con agua limpia y con presencia de sedimento. El prototipo hidráulico consta de un canal rectangular que permite variar su inclinación. Los ensayos se realizaron con un caudal de 2.5 L/s y ángulos de inclinación del canal rectangular de 20°, 35° y 45°. En las pruebas físicas los resultados de caudal fueron totales ya que no fue posible medir el caudal captado por cada ranura. Las pruebas experimentales con agua limpia mostraron que la reja de barras de sección triangular fue más eficiente en el caudal captado. Sin embargo, las rejas de barras circulares mostraron mayor eficiencia en la remoción de sólidos en agua con sedimentos.

En un segundo escenario, para determinar el caudal de agua limpia captado en cada ranura de la reja, así como su velocidad y presión, se realizó la configuración y calibración de un modelo numérico 2D a partir del resultado de una prueba del prototipo A-5 analizado en [6]. Una vez que se calibró el modelo numérico, se realizó un estudio paramétrico para evaluar el efecto sobre el flujo capturado con la modificación de la sección de la barra, la inclinación de la reja, la posición a lo largo del canal (superior, media, inferior) y el tamaño de la ranura. Por lo tanto, este estudio permitió determinar la tendencia del flujo capturado en el total y en cada ranura de la reja de efecto Coanda. El estudio paramétrico 2D CFD se realizó con el código numérico ANSYS FLUENT 2020 R1 versión académica

4

1.2. Estado del arte

En la presente sección se recopila el estado del conocimiento de los sistemas de captación de fondo, formados principalmente por barras longitudinales sumergidas paralelas y transversales al flujo.

Aunque el presente estudio se centra en el funcionamiento hidrodinámico de rejas de fondo con barras transversales o perpendiculares a la dirección del flujo, específicamente las denominadas rejas de efecto Coanda y su desempeño tanto en la captura de agua como en la eficiencia de remoción de sedimentos, los estudios previos sobre las tomas de fondo son importantes, debido a que hay algunas formulaciones propuestas para las tomas de efecto Coanda que se derivan de las formulaciones de rejas de fondo con barras paralelas al flujo.

1.2.1. Captaciones de fondo

Una captación de fondo es una estructura ubicada en la parte inferior de un canal o un azud con el propósito de desviar una parte del flujo. La estructura está compuesta básicamente de una abertura en el fondo del canal o azud cubierta con una reja metálica para evitar el ingreso de material sólido no deseado a través de la abertura [9]. Las rejas de fondo encuentran una aplicación considerable dentro de la Ingeniería Hidráulica como estructura de admisión, por ejemplo, bocatomas tirolesas o caucasianas con vertederos o azudes con canal de recogida. Otra aplicación importante se encuentra en los sumideros de aguas de lluvias de drenajes pluviales en zonas urbanas.

1.2.2. Clasificación de las rejas de fondo

En términos generales, las rejas de fondo se pueden clasificar en cuatro categorías [9]:

- 1. Rejas de fondo con barras longitudinales paralelas a la dirección del flujo. Este es el tipo de reja más utilizado.
- 2. Rejas de fondo con barras transversales a la dirección del flujo. Objeto de estudio de la presente investigación.
- 3. Placas perforadas, con aberturas uniformemente espaciadas.
- 4. Ranuras de fondo, no utiliza reja.

Los tipos de rejas mencionados anteriormente pueden disponerse de forma horizontal o inclinada respecto al lecho de acceso al canal.

El funcionamiento hidráulico de las rejas es influenciado por la disposición de las barras:

- Barras paralelas al sentido del flujo.
- Barras transversales al flujo.



Figura 1.2. (a) Reja con barras paralelas al flujo; (b) Reja con barras transversales al flujo.

En la ingeniería de suministro de agua, las rejas se utilizan para diversos fines:

• Eliminación de materia flotante y suspendida de gran tamaño que de otro modo podría obstruir tuberías, dañar bombas y otros equipos mecánicos o interferir con el funcionamiento satisfactorio de los procesos de tratamiento.

• Clarificación del agua mediante la eliminación de materia en suspensión incluso de pequeño tamaño, para aligerar la carga en los procesos de tratamiento posteriores. En particular, las rejas se utilizan para evitar que los filtros se obstruyan demasiado rápido.

1.2.3. Dimensionamiento de la reja de fondo

Generalmente las captaciones de fondo se componen de una reja ubicada en el fondo de un canal, que permite captar parte del agua que pasa sobre la reja. Estas estructuras han sido generalmente adoptadas en pequeños ríos de alta montaña, en cauces de alta pendiente, sobre una configuración irregular del lecho, con intenso transporte de sedimentos y flujo de avenidas

Su diseño está enfocado a cumplir con dos objetivos fundamentales y contrapuestos que son, captar la mayor cantidad de agua posible y excluir la mayor cantidad de materiales sólidos, sin que éstos sólidos puedan obstruir de manera significativa la reja.

6

La eficiencia de la reja depende de diversos factores tales como: la cantidad de agua, las condiciones de entrada del flujo aguas arriba y al final de la reja, la inclinación, forma de las barras y el espaciamiento entre ellas. Con el fin de captar la mayor cantidad de agua y con la menor longitud de reja, aguas arriba se realizan estructuras para el control de flujo en la entrada.

El diseño de una reja de fondo está basado en consideraciones hidráulicas, geomorfológicas, estructurales, ambientales y económicas, requiere especial atención para minimizar el mantenimiento y los problemas de funcionamiento que no pueden resolverse fácilmente, y que deberán ser atendidos durante la vida útil del proyecto.

El correcto funcionamiento de este tipo de obras depende de diversas variables como:

- El espaciamiento entre barras respecto a su ancho; la forma de éstas para que puedan mejorar la captación por unidad de longitud de reja;

- La pendiente longitudinal de la reja, para evitar la obstrucción y facilitar la autolimpieza;
- Las condiciones de aproximación del flujo, como el número de Froude del flujo entrante a la reja;

- La disposición de las barras respecto a la dirección del flujo.

1.2.4. Diseño hidráulico de la reja de fondo

Al tratarse de una estructura relevante dentro del campo de la Ingeniería Hidráulica, el problema de diseñar correctamente el área mínima necesaria para derivar el caudal requerido y remover la mayor cantidad de sedimento posible, ha atraído la atención de varios investigadores quienes investigaron el problema tanto teórica como experimentalmente.

Una aproximación teórica habitual es considerar que el flujo sobre la reja es unidimensional con caudal progresivamente decreciente, asumiendo como válida la distribución hidrostática de presión sobre la reja a lo largo del flujo. Una vez ajustado un coeficiente de descarga, se aplica el principio de conservación de la energía.

La forma y disposición de las barras influye en el comportamiento hidráulico de las rejas de fondo [10]. En el caso de rejas con barras longitudinales paralelas al flujo, la derivación de caudales se suele expresar como una función del valor de la energía de flujo local, dado que el término de energía cinética del agua contribuye a la captación

de caudal. Mientras, en el caso de barras dispuestas de forma transversal a la corriente, la derivación de caudales se suele relacionar con la profundidad de flujo local, dado que el término de energía potencial es el que fundamentalmente contribuye a la captación [1]. Respecto a la pérdida de energía por unidad de peso del fluido a lo largo de la reja, en algunos estudios se asume que es despreciable [3], [4], [11], [12]; mientras en otros se parte de la hipótesis de energía específica constante, por lo que la pendiente de la línea de energía equivale a la pendiente de fondo [13]–[16].

En [3], en base a las mediciones de las velocidades a lo largo del flujo, se afirma que los efectos de disipación de energía son apreciables en el tramo final de la reja, donde se reduce la profundidad del flujo y la fricción aumenta significativamente.

1.2.5. Caudal capturado por una reja de fondo

La ecuación del orificio se emplea con frecuencia para calcular el caudal específico derivado a través de la reja de fondo por unidad de longitud y ancho de reja, $q_d = d_q/d_x$ (m³/(s·m)). La descarga a través del orificio está influida por la distribución de la velocidad en la proximidad del mismo, esto se considera introduciendo un coeficiente de velocidad, C_V . De forma similar, un cambio de sección supone una contracción del flujo que se introduce mediante un coeficiente de contracción, C_c . Ambos coeficientes requieren medición experimental y dependen de la forma las barras, espaciamiento entre ellas y disposición respecto al sentido del flujo. La ecuación del orifico sería:

$$\frac{dq}{dx} = C_v C_c m \sqrt{2gH} = C_{qH} m \sqrt{2gH} \qquad (1.1)$$

donde:

m: índice de huecos

H: energía total disponible referida al plano de la reja

x: coordenada longitudinal a lo largo de la reja

 C_{qH} : coeficiente de descarga en función de la altura de energía, que equivale al producto $(C_{\nu}C_{c})$



Figura 1.3. Esquema de una abertura de reja de ancho b1 y definición del índice huecos

En rejas de fondo cuyas barras se disponen transversales a la dirección del flujo, se suele expresar la ecuación (1.1) en función del calado del flujo sobre el punto de cálculo.

$$\frac{dq}{dx} = C_{qh}m\sqrt{2gh} \qquad (1.2)$$

Donde:

h: altura de la lámina de agua medida perpendicularmente al plano de la reja C_{ah} : coeficiente de descarga en función del calado.

Las estructuras de toma de fondo han sido objeto de estudio de muchos investigadores quienes han propuesto varias ecuaciones y formulaciones. En la tabla 1.1, se presenta un resumen de la ecuación de descarga a través de la reja según diversos autores.

 Tabla 1.1. Resumen de ecuaciones para calcular el flujo de descarga a través de una reja de fondo longitudinal.

Autor	dq/dx
Garot, [17]	$C_{qh}m\sqrt{2gh(x)}$
De Marchi, [13]	$C_{qH}m\sqrt{2gH_0}$
Bouvard, [11]	$C_{q_0}m\sqrt{2gh(x)\cos\theta}$
Noseda, [14]	$C_{q_h}(h)m\sqrt{2gh(x)}$
Frank, [18]	$C_{qh}m\sqrt{2gh(x)\cos\theta}$
Mostkow, [1]	$C_{qH}m\sqrt{2gH_0}, C_{qh}m\sqrt{2gh(x)}$
Nakagawa, [19]	$C_{qH}(x)m\sqrt{2gH_0}$
Krochin, [16]	$C_{qH}m\sqrt{2gH_0}$
Brunella, [3]	$C_{q_0}m\sqrt{2gh(x)\cos\theta}$
Ahmad, [20]	$C_{qH}m\sqrt{2gH_0}$
Riguetti, [4]	$C_{qH}(x)m\sqrt{2gH_0}$

Donde:

h(x): altura de lámina de agua perpendicular al plano de la reja en función de la posición (x)

 $C_{qh}(x)$: coeficiente de descarga en función de la altura de la lámina de agua h $C_{qH}(x)$: coeficiente de descarga en función de la energía y de la coordenada x H_0 : altura de energía del flujo de aproximación al inicio de la reja C_{q0} : coeficiente de descarga estático con velocidad de aproximación a la reja despreciable, también se denomina coeficiente de contracción, C_c ;

 θ : ángulo de inclinación de la reja respecto a la horizontal.

1.2.6. Perfil del flujo sobre una reja de fondo

El agua que se desplaza sobre una reja de fondo se clasifica como un Flujo Espacialmente Variado (FEV) con caudal decreciente, q_d , en función de la coordenada x, se considera que la pérdida de energía en una reja horizontal es despreciable por lo que la aplicación de la ecuación de conservación de energía es aceptada. En el análisis del perfil de la lámina de agua a lo largo de la reja de fondo se debe considerar lo siguiente:

- Flujo unidireccional y unidimensional
- Distribución de velocidades uniforme a lo largo de cada sección transversal, coeficientes de velocidad y presión constantes.
- Distribución hidrostática de presión.

En consecuencia, se aplica el principio de la energía a la superficie de la lámina de agua:

$$H = z + h + \frac{U^2}{2g} \tag{1.3}$$

Donde z es la distancia en vertical del plano de referencia al plano de la reja; h es el calado medido perpendicularmente al plano de la reja; U es la velocidad media del flujo en cada sección; g es la aceleración de la gravedad;

En el análisis del perfil del flujo se considera dos criterios:

- La línea de energía es paralela a la pendiente de fondo [13]–[16], Figura 1.4a.
- La energía del flujo por unidad de peso mantiene un nivel constante [3], [4], [11],
 [12], Figura 1.4b.



Figura 1.4. Esquema de reja (a) línea de energía paralela al fondo del canal (b) línea de energía horizontal, adaptado de [21].

1.2.7. Coeficiente de descarga y perfil de las barras de la reja de fondo

En las referencias [1], [3], [11], [13], [17], se considera el coeficiente de descarga constante a lo largo de toda la reja de fondo y en las referencias [4], [14], [19] como una función variable a lo largo de la reja de fondo.

A partir de la fórmula propuesta en [22], en [17], se determina el coeficiente de descarga

$$\Delta h = \beta \left[\frac{b_w}{b_1}\right]^{4/3} \frac{v_1^2}{2g} \sin\theta \tag{1.4}$$

Donde:

 v_1 : velocidad perpendicular al plano de la reja

 θ : ángulo que el vector velocidad forma con el plano de la reja

 β : coeficiente de forma

*b*_w: ancho de la barra

b1: espacio entre barras.

En [17] se considera que las pérdidas de carga a través de la reja de fondo son iguales a la carga estática del flujo o el calado de la lámina de agua sobre la reja, en tal sentido asume que:

$$\Delta h = h$$
$$v_2 = C_{qh} \sqrt{2gh}$$
$$v_1 = mv_2$$

Donde:

 v_2 : velocidad del flujo a través de las barras.

m : índice de huecos.

En base a las hipótesis anteriores se obtiene la siguiente ecuación:

$$C_{qh} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{b_1}{b_1 + b_w}\right)^2 \beta \left(\frac{b_w}{b_1}\right)^{4/3}}}$$
(1.5)

Los resultados de las longitudes de reja mojadas para captar la totalidad del caudal entrante medidas en laboratorio son presentados en [17], se determina que el valor del coeficiente de descarga no es constante a lo largo de la reja.

Como objetivo destacado, en [10] proponen ensayar diversos tipos de rejas para evitar la oclusión que se presentaba en las rejas de sección circular. Los ensayos se realizaron con el fin de conocer el perfil de reja que sea capaz de resistir las caídas de bloques de piedras, absorber la mayor cantidad de agua posible en una longitud mínima y evacuar efectivamente los sedimentos. Manteniendo todas las características del flujo aguas arriba y la relación constante de índice de huecos, m = 0.311.

En [23] se calcula el coeficiente de descarga por unidad de longitud, $C_{qh}(h)$, y se comprueba que es variable. Lo determina experimentalmente midiendo el caudal derivado por unidad de longitud a partir de la siguiente expresión:

$$C_{qh}(h) = \frac{\Delta q_d}{m\Delta L\sqrt{2gh}} \tag{1.6}$$

Siendo Δq_d el caudal experimental (por unidad de longitud) derivado en el segmento de longitud.

 ΔL y *h* el valor experimental de la profundidad media de agua en el tramo considerado.

En [23] se asume que las diferencias como consecuencia de la variación de la pendiente no son importantes.

Para un flujo de aproximación sobre la reja en régimen lento el coeficiente de descarga se calcula con:

$$C_{qh}(h) = 0.66m^{-0.16} \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.13}$$
(1.7)

Para un flujo de aproximación sobre la reja en régimen rápido, el coeficiente de descarga es, solo definido para el índice de huecos m = 0.28:

$$C_{qh}(h) = 0.78 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.13}$$
(1.8)

Las relaciones anteriores deben ser aceptadas como válidas para el rango de valores ensayados que son: 0.20 < h/l < 3.50 y 0.15 < m < 0.30.

En [1] se realiza un análisis sobre las rejas de fondo con barras longitudinales de perfil rectangular y sobre una reja perforada. Se afirma que las pérdidas de energía en la entrada de la reja corresponden al ángulo que forma el vector velocidad en el plano de la reja con la vertical.

En [18], bajo la hipótesis de que el perfil de la lámina de agua se ajusta a una elipse, se integra dicha ecuación a lo largo de toda la reja e iguala el valor del coeficiente de descarga medio, C_{qh} , al definido en [14], obteniéndose la expresión:

$$C_{qh} = 1.22C_{qh}(h_0) \tag{1.9}$$

Donde:

 h_0 : calado al inicio de la reja

 $C_{qh}(h_0)$: coeficiente de descarga para el calado al inicio de la reja.

Un coeficiente de descarga C_{qh} constante que representa las características geométricas del orificio de la reja es propuesto en [15]. Este parámetro coincide con el valor del coeficiente de descarga estático propuesto en [14], $Cq_0 = 0.72$. Además, incluye un nuevo parámetro ψ que representa la influencia de la forma, el espesor de las barras, de las características del flujo aguas arriba, pendiente y del caudal derivado.

En [16] se presenta la siguiente metodología de cálculo para determinar el coeficiente de descarga C_{aH} :

$$C_{qH} = C_0 - 0.325 \tan \theta \tag{1.10}$$

Donde θ es la pendiente longitudinal adoptada por la reja; $C_0 = 0.60$ para $e/b_1 \ge 4$; $C_0 = 0.50$ para $e/b_1 < 4$; e es el canto de la barra y b_1 es el espacio entre barras. Este coeficiente es válido solamente para rejas con barras rectangulares.

En [24] se definen una serie de gráficos en los que relaciona el caudal entrante con el rendimiento de caudal captado al final de la reja para diversas configuraciones de longitud de reja y de espaciamiento entre barras. Se propone además un coeficiente de descarga, C_{ah} = 0.815 para los casos de índice de huecos *m* = 0.333.

En [25] se señala que el coeficiente de descarga Cq varía a lo largo de la reja.

En [26], se utiliza un modelo a escala 1:10, barras de sección circular de 10cm de diámetro longitudinales al flujo, separación entre barras de 15 cm, índice de huecos *m* = 0.60. El ancho del canal en campo es de 5 m. Caracteriza las longitudes de reja necesarias para captar un determinado caudal. En las experiencias conocidas hasta el momento para índices de huecos menores, [10], [14], los caudales captados por unidad de longitud adoptan valores más elevados en el tramo inicial de la reja y van disminuyendo conforme avanza el agua a lo largo de la reja.

En [27] se desarrolla un estudio en un canal de laboratorio de 0.25 m de ancho con rejas longitudinales de 0.45 m, barras prismáticas redondeadas en su coronación. Determinan que la pérdida de energía del flujo a lo largo de la reja es inferior al 2% lo que justifica la hipótesis de considerar que la línea de energía específica sea constante.

En [3] se realizaron experimentos en un canal rectangular de 0.5 m de ancho y 7 m de largo. Se utilizó una estructura tipo cresta ancha horizontal de 0.90 m de largo como transición entre una cámara amortiguadora y la toma de fondo. Su esquina aguas abajo se redondeó con un radio R1 = 0.08 m con la reja inferior unida tangencialmente, lo que proporcionó una transición suave desde el tramo horizontal aguas arriba hasta el tramo inclinado aguas abajo. Utilizaron barras circulares con diámetros de 12 y 6 mm, longitud de 0.60 y 0.45 m y espacio libre de 6 y 3 mm, respectivamente. Las barras están dispuestas longitudinalmente a la corriente y con pendiente longitudinal de la reja

variable de 0, 7, 19, 28, 35, 39, 44 y 51°. Justifican el valor del coeficiente de descarga estático medido mayor que 1 debido al efecto Coanda producido por la curvatura y la sub presión que se desarrolla a lo largo de las barras circulares. Proponen el uso del coeficiente de descarga estático, C_{q0} , como coeficiente de descarga constante para toda la reja y que permite ajustar la longitud de reja mojada necesaria para captar un caudal. La longitud de reja mojada presenta valores que se aproximan moderadamente al ajuste de L_2 , propuesto en [28] en su modelo a escala, donde ambas longitudes se han obtenido para barras circulares y para el mismo índice de huecos m = 0.60.

En [4], a partir del mismo canal de laboratorio y reja de fondo utilizada en [27], analizan el valor del coeficiente de descarga C_{qH} , en función de los valores experimentales y llegan a la siguiente expresión recogida en la ecuación:

$$C_{qH} = C_{q0} \left(a \frac{x}{H_0} F_{H_0} + 1 \right) \left[\tan h \left(b_0 \sqrt{2} - F_{H_0} \right) \right]^{b_1}$$
(1.11)

Donde:

a, b_0 , c_0 son coeficientes empíricos ajustados mediante el uso de un algoritmo genético, así obtuvieron *a* = -0.1056; b_0 = 1.5; y b_1 = 0.478;

 F_{h0} es el número de Froude al inicio de la reja.

La función recoge la influencia del número de Froude en el coeficiente de descarga. Cuando el número de Froude tiende a cero el coeficiente de descarga tiende al coeficiente estático. Para valores elevados de b_0 se obtiene que la función tiende a 1. Dicha fórmula está creada para el valor máximo de $F_{H_0} = \sqrt{2}$, donde ésta se anula. El coeficiente *a* sirve para ajustar el producto adimensional $a \frac{x}{H_0} F_{H_0}$, al coeficiente de descarga medio $C_{qH}(x)$, obtenido a partir de las simulaciones de laboratorio y ajustado para cada *x*. Los coeficientes b_0 y c_0 se obtuvieron para minimizar el error respecto a los valores medidos en laboratorio. Así, según [4] quedaría:

$$\Delta Q = C_{q0} m b L \sqrt{2gE_0} \left(\frac{a}{2} \frac{L}{H_0} F_{H0} + 1 \right) \tan h \left[b_0 \left(\sqrt{2} - F_{H_0} \right)^{b_1} \right]$$
(1.12)

En la campaña experimental desarrollada en [4], los números de Froude variaron desde 1.02 hasta 2.05.

El perfil de la lámina de agua calculado a partir del C_{qH} propuesto es comparado en [4] con los valores medidos en [14] en laboratorio y verifican un buen ajuste.

1.2.8. Influencia de la inclinación de la reja

En el caso de agua limpia, el aumento en la inclinación de la reja acelera el flujo y hace que disminuya el caudal captado por unidad de longitud. En [29] se define la longitud de reja en función de su inclinación, la relación $j = h_0/h_c$ y el número de Froude a la entrada F_{r_0} .

A partir de ensayos experimentales con pendientes de hasta el 20%, en [14] se concluye que existe una influencia de la pendiente, pero es limitada, alcanzando como mucho, diferencias en el caudal derivado no superiores al 7% respecto a lo calculado a partir del coeficiente de descarga propuesto y partiendo del calado crítico al inicio de la reja.

La influencia de la pendiente longitudinal de la reja sobre caudal captado es comprobada en [10]. Coeficientes de descarga que disminuyen con la inclinación de la reja son propuestos en [1] y [16].

En [3], en su trabajo con rejas formadas por barras circulares, se comprueba que para elevados valores de pendiente longitudinal 34.43 y 96.56% ($19^{\circ} < \theta < 44^{\circ}$), esta no influye en el perfil de la lámina de agua, mientras que para menores inclinaciones 0 y 12.81% ($0^{\circ} < \theta < 7.3^{\circ}$), se encuentran diferencias en el perfil de la lámina de agua. En el caso de agua con sedimentos que pueden obstruir la reja, la influencia de la pendiente longitudinal en el caudal captado es muy importante.

1.2.9. Distribución de velocidades y presiones sobre la reja

En lo que se refiere al vector velocidad del flujo sobre la reja, entendido como bidimensional, en diversos desarrollos teóricos se asume que la componente en la dirección longitudinal, *x*, del vector velocidad, *u*, se iguala a la velocidad media en la dirección longitudinal, que se mantiene constante a lo largo de la coordenada *z* para cada *x* fijado [30]–[33], es decir:

$$u = U = \frac{q}{h} \tag{1.13}$$

Donde *U* es el promedio del vector velocidad en la dirección longitudinal. A partir de esta hipótesis, en [33] se propone calcular el movimiento del agua sobre la reja bajo las hipótesis de flujo potencial.

En [19], bajo la hipótesis de que la componente longitudinal de la velocidad, u, se iguala al promedio de la velocidad en la dirección longitudinal para la sección de cálculo, U, multiplicada por una función que varía según la posición en la vertical de la sección transversal y que se mantiene constante a lo largo de x:

$$u = Uf'\left(\frac{z}{h}\right) = \left(\frac{q}{h}\right)f'(m) \tag{1.14}$$

Para facilitar el análisis del flujo, en los estudios realizados en las referencias [1], [3], [4], [11]–[15], [17], [23], se asume que existe una distribución hidrostática de presiones sobre la reja. Sin embargo, en [1] y [27] se comprueba que no se produce dicha distribución hidrostática de presiones sobre la reja.

En [16] se basa en los experimentos realizados en [34] para rejas compuestas por barras paralelas y longitudinales al flujo, en donde indica que la distribución de presiones se aparta de la hidrostática, por lo que no considera como carga sobre la reja a la altura de agua que hay sobre ella y calcula el ángulo de inclinación θ de la velocidad del flujo en la entrada de la reja. Para una partícula de agua cualquiera de peso específico *y* situada distancia *x* del comienzo de la reja, la componente vertical de la velocidad *v*, causada por la presión denominada *P*_{hendidura}, medida en el centro del hueco y en la coordenada *y* = 0, que se mide en m.c.a., será:

$$v_h = \sqrt{2g\left(\frac{P_{hendidura}}{\gamma}\right)} \tag{1.15}$$

y la componente de velocidad horizontal:

$$u_{h} = \sqrt{2g\left(H_{0} - \frac{P_{hendidura}}{\gamma}\right)}$$
(1.16)

Entonces la velocidad resultante es:

$$U_h = \sqrt{u_h^2 + v_h^2} = \sqrt{2gH_0}$$
(1.17)

Donde:

$$\beta = \arctan\left(\frac{u_h}{v_h}\right) \tag{1.18}$$

A partir de estas hipótesis, en [16] se asume que la velocidad con que el agua atraviesa la reja podría considerarse como un valor medio constante en magnitud en todos sus puntos. De aquí no se puede concluir que la distribución del caudal sea también uniforme a lo largo de la reja por cuanto al ángulo de los filetes líquidos con la vertical es variable. En [35] se define el valor medio del ángulo β de inclinación del vector velocidad con la vertical al plano de la reja como un valor:

$$\cos\beta = \frac{1}{3} = 0.577 \rightarrow \beta = 54^{\circ}46'$$
 (1.19)

En las referencias [27] y [3] se señala que la inclinación del vector velocidad ($\phi=90^{\circ}-\beta$) a lo largo de reja es variable.

En [19] se recoge las experiencias presentadas en [36], donde para rejas de barras longitudinales se fija un valor constante de β a lo largo de la reja pero que varía con el caudal.

Con el uso de un anemómetro laser Doppler (LDA), en [27] se realiza las mediciones de las dos componentes de la velocidad producidas en una sección transversal de la reja y para los diversos huecos existentes. Comprueban que la velocidad vertical no varía prácticamente de un hueco a otro, lo cual confirma la bidimensionalidad del fenómeno. Presentan además mediciones de la distribución de la velocidad en un plano longitudinal a la corriente entre dos barras, donde se presentan las componentes horizontal y vertical del vector velocidad a lo largo de la reja.

De su análisis experimental también presenta la desviación de la presión Δp en el fondo respecto a la presión hidrostática P_{hidr} , a lo largo del eje de un espaciamiento de la reja.

La distribución de las velocidades en diversas secciones es determinada por [3], observando que la velocidad media aumenta a lo largo de la superficie libre, dado que los calados disminuyen.

$$U_s = \sqrt{2g(H_0 + x\sin\theta)} \tag{1.20}$$

Donde U_s = módulo del vector velocidad en la superficie; en la entrada de la reja se asume que $H_0 = 1.5 h_c$. Siendo H_0 el nivel de energía a la entrada de la reja considerado como constante; $xsin(\theta)$ la diferencia de cota entre la zona horizontal del canal y la rasante del plano de la reja medida en vertical.

Comparando los datos observados y calculados con la ecuación de U_s se comprueba que hasta X = 1.5, la relación U_s/U_c presenta resultados similares, para valores mayores hay una desviación de los puntos debido a los calados pequeños al final de la reja y por el incremento significativo de la fricción.

En [4], se señala que la componente vertical de la velocidad dentro de la ranura es mayor que en el campo de flujo por encima de la reja, basado en los resultados de las medidas de las velocidades sobre la reja y entre dos barras adyacentes, variando también en función del número de Froude. Comprueban que el caudal derivado disminuye al aumentar el número de Froude.

En las referencias [1], [27], [37]–[39], se comprueba experimentalmente que la distribución de presión no es hidrostática a lo largo de la reja pero a la hora de realizar cálculos se asume dicha hipótesis con el objeto de simplificarlos. Cuanto más cerca se esté de la superficie de la lámina de agua, más veraz es esta hipótesis. De esta forma a la hora de calcular el perfil de la lámina de agua se obtienen aproximaciones que se pueden validar experimentalmente analizando la distribución de velocidades medias a lo largo de la reja [3].
1.2.10. Presencia de sedimentos en el diseño de rejas de captación de fondo

Los caudales de los sistemas de captación pueden transportar sedimentos de fondo y/o en suspensión. Cuando los sólidos se depositan en las aberturas entre dos barras paralelas y obstruyen la reja, la capacidad de captación de la reja de fondo puede afectarse considerablemente.

En base a obras existentes y de las experiencias realizadas en laboratorio, en [10] se realiza un análisis cualitativo de la influencia de los sedimentos, menciona que un sólido de una dimensión similar al espaciamiento entre dos barras se incrusta sin importar el tipo de perfil; la retención de las piedras entre las barras se facilita si el perfil tiene la parte superior redondeada; es posible disminuir el riesgo de taponamiento de las rejas, evitando el transporte desordenado del material de transporte, para ello es aconsejable construir un canal de aproximación con longitud suficiente y pendiente similar a la de la reja.

En [16] se indica que los sedimentos como arena y piedras pequeñas de dimensiones menores al espaciamiento entre dos barras longitudinales paralelas al flujo, ingresarán por la reja al canal de conducción, razón por la cual es imprescindible la construcción de un desarenador eficiente a continuación de la toma, recomienda que la reja debe ser de barras de hierro, de sección rectangular o trapezoidal, con la base mayor hacia arriba, colocadas paralelamente a la dirección del río. No aconseja las barras de sección circular pues se obstruyen con arena y piedra fina y son más difíciles de limpiar.

En [40] se propone un espacio entre barras próximo a 0.1 m y una pendiente longitudinal cercana al 20%. A partir de la experiencia en las captaciones tirolesas de la compañía hidroeléctrica Tiroler Kraftwerke AG, en [41] y [26], se recomienda el uso de un espacio entre barras cercano a los 0.15 m, para un $d_{95} \approx 0.060$ m, una pendiente longitudinal entre el 20 y el 30% y un coeficiente de incremento de la longitud de la reja para compensar las áreas obstruidas de 1.5 a 2.0, recogido también en [27].

En [16] se propone un espaciamiento entre barras de 0.02 a 0.06 m para captaciones hidroeléctricas, con inclinaciones de las rejas que van desde la posición horizontal hasta el 20% e incluye en su ecuación para el cálculo de la longitud de reja mojada, un factor f de reja ocluida. Basado en los mismos sistemas de captación de fondo

presentados en [40], se consideró un espacio entre barras próximo a 0.10-0.12 m (0.02-0.03 m en caso de sistemas de captación para plantas de producción hidroeléctrica), una pendiente de las rejas entre el 30% y el 60%, y un factor de incremento del área de huecos de las rejas de 1.5 a 2.0. En [42] se recomienda un espaciamiento mínimo de barras de 0.005 m para rejas de barras longitudinales y una pendiente próxima al 20%.

- Cálculo de la obstrucción de la reja por sedimentos

En las referencias [1] y [16], para considerar el efecto de obstrucción de los sedimentos en la reja, se utiliza un coeficiente k que reduce el área total disponible para el caso de agua clara y que compensa la longitud de la reja obstruida.

$$L = \left[\frac{0.313q}{\left(C_q k\right)^{3/2}}\right]^{2/3}$$
(1.21)

$$k = (1 - f)m$$
(1.22)

Siendo *f* el porcentaje de la superficie de reja que queda obstruida por arena y grava que se incrustan entre las rejas, recomendando valores de 15 - 30%.

En [43], se menciona que el diseño de una obra de captación de fondo debe garantizar la captación de un caudal líquido fijo para toda la gama de caudales en el curso natural; debe minimizar el ingreso hacia la toma del material sólido grueso y material flotante, permitiendo el tránsito de éstos hacia el tramo aguas abajo del río. El espaciamiento entre barras puede alcanzar los 10 cm o más cuando el caudal derivado va a ser conducido a un embalse; mientras que si el caudal va a conducirse directamente al canal de carga debería ser más pequeño (2 cm o menos). La relación entre el ancho de la barra y el espaciamiento entre barras debe ser de 2:1 (m = 0.333). La sección de la barra debe seleccionarse considerando que el efecto de oclusión sea el mínimo. La pendiente longitudinal de la reja puede variar entre el 20% y el 30%. De acuerdo con datos experimentales, se necesita aproximadamente 2.0 m² de reja para captar 1.0 m³/s de agua.

Las ecuaciones propuestas en [12], son empleadas en [44] para calcular las dimensiones de la reja y recomiendan que la longitud escogida para la captación sea

igual a 1.20 veces la longitud calculada para garantizar la derivación del caudal de diseño aun cuando exista oclusión de la reja debido a la presencia de material flotante y grava.

Para el diseño de rejas de fondo de proyectos que incluyan turbinas o sifones, en [11], se recomienda utilizar espaciamientos entre barras de 0.02 a 0.03m., caso contrario el espaciamiento sugerido es de 0.10 y 0.12 m. La pendiente longitudinal de la reja suele variar entre 10% y 20%; sin embargo, debido a problemas de oclusión puede alcanzar un 30% o incluso 60%. La forma de las barras es muy importante, en [11] se consideran más factibles las formas que se presentan en la Figura 1.7.



Figura 1.5. Tipos de barras para captaciones de fondo.

Cuando existe riesgo de oclusión de la reja es recomendable incrementar la longitud calculada en 1.5 a 2.0 veces. Si no ocurre oclusión durante una crecida, el diseño con el incremento de longitud en la reja puede exceder la capacidad del desarenador, por lo que los cálculos deben validarse considerando el excedente de caudal que podría ser captado.

En [42] se señala que durante la creciente de un río, la cantidad de sedimento arrastrada puede alcanzar concentraciones volumétricas entre el 25% al 30%, por lo que el mínimo valor de espaciamiento entre barras que debe considerarse es 0.005 m, es recomendable una pendiente longitudinal de la reja del 20%, aunque puede variar entre 5% y el 35%. La forma de las barras afecta la eficiencia de la reja y su estabilidad.

En [45], en base a la experiencia en la captación con reja de fondo del Río Macho, se menciona que el incremento en el área de la reja es una medida discutible debido a que el porcentaje de obstrucción de la reja es imposible de predecir; al incrementar la longitud de la reja, es posible que el material arrastrado se acumule en el tramo en exceso propiciando la oclusión de la reja cuando haya finalizado una crecida; es necesario realizar mantenimiento periódico de este tipo de estructuras.

En [46] se recomienda incrementar la longitud calculada de reja en condiciones de agua clara para considerar el efecto de la oclusión. Generalmente los valores utilizados varían entre el 25% y el 50% de incremento.

En [47] se presentan recomendaciones de diseño de captaciones de fondo para pequeñas centrales hidroeléctricas (entre 1 MW y 10 MW), señalan que las principales variables para considerar en el diseño son: el espaciamiento entre barras, *b1*, y la distancia entre centros de barras, *bw+b1*. La selección de los valores *bw y b1* depende del tamaño del material que podría ser captado por la reja sin causar problemas en las estructuras siguientes de un proyecto de generación de electricidad. En este contexto, para el espaciamiento entre barras se recomiendan los valores de 0.02 a 0.04 m. La pendiente longitudinal de la reja puede variar entre 30° y 45°, basados en la experiencia y en las prácticas comunes de diseño, mientras que la longitud de la reja se debe incrementar un 20% para considerar el efecto de la oclusión. La forma de las barras también es importante, no recomiendan el uso de barras rectangulares porque se obstruyen más fácilmente y sugieren el uso de barras con la parte superior tipo bulbo o barras con la parte superior en forma de cilindro.

En [48] se realizó ensayos utilizando tres tipos de grava cuyos diámetros medios, d50, son: 8.3 mm (grava 1); 14.8 mm (grava 2) y 22.0 mm (grava 3); la grava 1 y la grava 3 tienen un predominio de formas redondeadas (40% y 43% respectivamente); mientras que la grava 2 tiene caras de fractura (45%). El primer tipo de grava se ensaya con la reja de m = 0.22 mientras que los dos tipos restantes de grava se utilizan para la reja de m = 0.28. Las pruebas se realizaron con tres tipos de caudales: 77.0; 114.6 y 155.5 l/s/m en cinco diferentes pendientes (0%, 10%, 20%, 30% y 33%). El resultado de las experiencias en laboratorio permite determinar que el depósito de sedimento en la reja produce un incremento en el calado sobre esta, aumentando el caudal rechazado. Bajas pendientes longitudinales de reja producen mayor cantidad de caudal rechazado (contrario a lo que ocurre en ensayos con agua clara). Se define una zona de deposición preferente (una vez ocluida la reja, no se deposita más material), que ocurre cuando el ángulo del vector velocidad con la reja es mayor. La eficiencia en la captación para flujos con gravas aumenta con la pendiente longitudinal de la reja hasta el 30%. Se define un índice de huecos modificado en función de la oclusión de la reja (índice de huecos efectivo, m) que se puede obtener utilizando la siguiente relación:

$$U_0\left(\frac{d_{50c}}{b_1}\right)\left(\frac{1}{W^{0.205}}\right) = 3.0684\left(\frac{m'}{m}\right) + 2.4094$$
(1.23)

Donde: d_{50C} es el diámetro medio del grano considerando la dimensión c del elipsoide, b_1 es el espaciamiento entre barras de la reja, *W* es el peso promedio de las partículas y U_0 es la velocidad al inicio de la reja para obtener el calado.

$$\frac{h_0}{h_c} = 0.90 \left(\frac{q_1 \tan \theta}{m}\right) - 0.77 \left(\frac{q_1 \tan \theta}{m}\right)^{\frac{1}{2}} + 0.82$$
(1.24)

Las longitudes de la reja recalculadas con el índice de huecos efectivo, m', van incrementando al disminuir el valor de la pendiente longitudinal y se aproximan a la propuesta en [16] para considerar el efecto de la oclusión.

En [21] se realizaron pruebas de laboratorio con tres caudales: 0.077; 0.1146 y 0.1555 m³/s/m, cinco pendientes (0%, 10%, 20%, 30% y 33%) y con tres tipos diferentes de grava cuyos diámetros característicos, d50, son: 8.3 mm (grava 1); 14.8 mm (grava 2) y 22.0 mm (grava 3). El primer tipo de grava se ensayó con la reja m = 0.22 mientras que los dos tipos restantes se utilizaron para la reja m = 0.28. Como resultado de las experiencias en laboratorio se obtuvo el índice de huecos efectivo, *m'*, considerando la longitud total de la reja (L = 0.90 m) y el caudal rechazado en cada ensayo realizado. Adicionalmente, se presentan relaciones entre los valores de *m'/m* (factor de oclusión) y algunos parámetros hidráulicos (al inicio de la reja) como la velocidad, el Número de Froude, el esfuerzo cortante o el Número de Froude densimétrico de las partículas y se obtuvo como resultado una ecuación que permite obtener el valor del índice de huecos efectivo:

$$\frac{U_0 d_{50c}}{b_1 W^{0.205}} = 3.068 \frac{m'}{m} + 2.409 \tag{1.25}$$

Donde U_0 es la velocidad media al inicio de la reja, d_{50c} es el diámetro característico del lado más angosto del elipsoide, y W es el peso promedio de las partículas que pueden ser retenidas en la reja.

1.2.11. Rejas de fondo con barras transversales al flujo

Estudios detallados de rejas de fondo con barras transversales al flujo son limitados en la literatura técnica. A continuación, se presenta un resumen de los estudios hasta donde lo permite la búsqueda exhaustiva realizada al respecto sobre este tipo de estructura.

En [49] se analizó el flujo a través de rejas sumergidas transversales con barras circulares, se desarrolló experimentos limitados al flujo de aproximación subcrítica usando dos tamaños diferentes de barras colocadas en diferentes espaciamientos. Como resultado de este estudio se propone un método de determinación del caudal a través de la reja, así como el cálculo de las profundidades de flujo en sus dos extremos. Los experimentos se realizaron en un canal de 18.6 m de largo, 0.75 m de ancho y 0.475 m de profundidad. A una longitud de 6.7m, el canal se reduce a un ancho de 0.5 m para lograr una mayor descarga por unidad de ancho. Las rejas están formadas por barras de acero circulares de diámetros de 12 mm y 25 mm con un tamaño de 0.5 m x 0.3 m, se colocaron en una abertura sobre todo el ancho del canal lo que resultó en un flujo bidimensional. Se usaron diferentes separaciones entre barras para cubrir un rango de índice de huecos de 0.2 a 0.5. El caudal en el canal principal aguas abajo de la reja se midió volumétricamente, mientras que el extraído a través de la reja se midió con un vertedero de cresta delgada. Observaron que la energía específica a lo largo de una reja transversal no es constante, sino que disminuye a lo largo de esta. Proponen un conjunto de ecuaciones que relacionan la longitud de la reja con los parámetros hidráulicos y se han obtenido relaciones empíricas para el coeficiente de contracción, así como el coeficiente de descarga.

En [50], en su trabajo sobre el funcionamiento hidráulico de rejas de fondo transversales, se observó que el valor del coeficiente de descarga C, no es constante, sino que varía con el flujo y los parámetros de la geometría de la reja, como el número de Froude (F1), relación del área de apertura (ϵ) y la relación entre el ancho de las barras y la longitud de la reja (a/L). Observaron que, para flujo supercrítico, C, varía de 0,11 a 0,45 para rejas de barras paralelas horizontales y para flujo subcrítico C, varía de 0,36 a 0,85. En las referencias [51]–[53], se propusieron ecuaciones para el coeficiente de descarga para condiciones del flujo de aproximación y características de la reja.

En [54], se presenta un análisis sobre la influencia de la geometría en la capacidad de captación de una reja de aguas lluvias, ensaya una reja no simétrica colocada en dos

sentidos distintos, observa que es necesario definir un parámetro que considere la disposición del área de huecos en la reja. A partir de una tipología simple de reja, realiza ensayos de captación para evaluar la evolución de la eficiencia a medida que se amplían las dimensiones de ancho y longitud. Finalmente se relacionan los datos de eficiencia con el número de Froude o la potencia hidráulica.

Los sistemas de captación de fondo tipo sumidero son utilizados en áreas urbanas para minimizar el riesgo de inundación provocado por una avenida como consecuencia de la escorrentía. En muchas ocasiones pueden alcanzar grandes dimensiones para posibilitar la captación de caudales importantes [55]–[57]. En áreas urbanas, el arrastre de sólidos puede ser considerable, por lo que un correcto dimensionamiento de los sumideros es indispensable. El estudio de los parámetros de diseño para la captación de caudales de avenida con elevado transporte de sedimentos, se reconoce de especial interés.

Mediante pruebas de laboratorio, en [58] se analizó el flujo sobre rejas fondo con barras transversales, con números de Froude que varían entre 0,1 a 1,5 y relación entre el espacio de las barras y la longitud de la reja que varía de 0,041 a 0,102. El estudio analiza el flujo a través de las rejas de fondo bajo el supuesto de que la energía específica permanece constante. Se confirma que el valor del coeficiente de descarga depende de los parámetros de flujo y geometría de la reja como el número de Froude (F), la porosidad (ϵ) y la relación entre el ancho de la barra y la longitud de la reja (a/L). Se demuestra que las relaciones funcionales existentes para el coeficiente de descarga de rejas de fondo de barras longitudinales son válidas para rejas de fondo de barras transversales. Se han desarrollado ecuaciones de regresión para rejas de fondo de barras transversales para tres tipos de condiciones de flujo (A3=subcrítico, B1= supercrítico, B2= Parcialmente supercrítico). La diferencia en los coeficientes de descarga obtenidos de las ecuaciones de regresión desarrolladas y los valores observados es del orden de 4.38 %, 6.28 % y 7.67 % para los tipos de flujo A3, B1 y B2 respectivamente.

1.2.12. Reja de efecto Coanda

Las obras de captación de agua superficial con rejas de fondo presentan una necesidad creciente de filtración de sólidos y partículas muy finas, así como pequeños organismos acuáticos. Desafortunadamente, con los diseños de rejas tradicionales, a medida que se reduce la separación entre las barras, aumenta la probabilidad de obstrucción y con ello la necesidad de mantenimiento.

Un diseño de reja que ofrece potencial para filtrar desechos finos con un mínimo mantenimiento de limpieza, es la reja de efecto Coanda. Dicha estructura ha sido utilizada en la industria minera desde aproximadamente 1955 [59]. Recientemente, esta reja auto limpiante sin partes móviles se ha utilizado con éxito para la exclusión de desechos y peces en varios proyectos de recursos hídricos [8], pero ha habido poca información técnica detallada disponible para los diseñadores hidráulicos. Un impedimento importante para la aplicación de las rejas de efecto Coanda ha sido la dificultad de predecir con precisión la capacidad de flujo de diseños de reja específicos. Las características principales de una reja de efecto Coanda se ilustran en la figura 1.8. La reja se instala en la cara aguas abajo de un vertedero de desbordamiento. El flujo pasa sobre una placa de aceleración y luego a través del panel de barras en forma de cuña. Las barras son horizontales, perpendiculares al flujo a través de la reja. La placa de aceleración puede ser un perfil en forma de conopial o un simple arco circular; el objetivo es proporcionar una aceleración suave del flujo y entregarlo tangente a la superficie de la reja en el borde aguas arriba. Normalmente, el panel de reja es un arco cóncavo con un radio de curvatura de aproximadamente 3 m, aunque también se pueden usar paneles de reja planos. El flujo que pasa a través de la reja (flujo filtrado) se recolecta en un canal de transporte debajo de la reja, mientras que el desbordamiento, los peces y los desechos pasan por el extremo aguas abajo de la reja.

Las velocidades de flujo a través de la reja son regularmente de 2 a 3 m/s, aumentando hacia la parte final de la reja. Los números de Froude a través de la superficie de la reja pueden variar de 1.2 a 10, en tanto que los mayores números de Froude son obtenidos cuando el caudal de derivación es mínimo (Caudal bypass) [60].

La alta capacidad de las rejas de efecto Coanda se debe principalmente a su construcción y disposición de barras; cada barra está inclinado de manera que su borde aguas arriba se intercepta con el flujo. Una fina capa del flujo se separa del fondo de la columna de agua y se dirige hacia al canal de aducción a través de la reja. Esta acción

de corte o cizallamiento puede depender en cierta medida de un fenómeno conocido como efecto Coanda. La literatura sobre estas rejas ha atribuido su alta capacidad al efecto Coanda, pero el mecanismo por el cual el efecto mejora la capacidad no se ha explicado completamente.

El efecto Coanda fue observado por primera vez en 1910 por Henri-Marie Coanda [61]. El efecto Coanda es la tendencia de un fluido a permanecer adherido a un límite sólido. Las principales aplicaciones del efecto Coanda han sido en aeronáutica.

La capacidad de la reja de efecto Coanda se expresa como la descarga (volumen / tiempo) que pasa a través de la superficie de la reja por unidad de ancho. Las descargas unitarias de interés son el flujo de entrada a la reja (flujo sobre la cresta); el flujo a través de la reja, y el flujo de derivación sobre la reja (q_{bypass}) que se descarga fuera de la punta aguas abajo.

En tasas bajas de flujo de entrada, todo el caudal puede ser capturado y la longitud mojada de la reja puede ser parcial, aumentando a medida que el flujo de entrada es mayor. Cuando la longitud mojada de la reja es total, se produce un caudal de excedencia que regresa al cauce natural del río. A medida que incrementa el flujo de entrada, incrementan el caudal a través de la reja, el caudal de excesos, y la profundidad de flujo sobre la reja [62].

El caudal captado pasa a través de la reja por una combinación de dos mecanismos. En primer lugar, las barras inclinadas desprenden capas delgadas del flujo desde la parte inferior de la columna de agua y entran a través de la reja. En segundo lugar, la presión del agua contra la reja causa que el flujo que pasa través de las ranuras, ingrese como si se tratara de orificios simples [62].

Ambos fenómenos actúan simultáneamente en diversos grados, dependiendo de las propiedades de la superficie de la reja y las características del flujo sobre esta. La acción de corte está relacionada principalmente con la inclinación de las barras y la velocidad del flujo. A medida que aumenta la velocidad, la acción de corte se hace más dominante. El comportamiento de orificio está relacionado con la porosidad (p = s/s+w), o el porcentaje de área de la reja abierta (es decir, el ancho de la ranura (s) en relación con el espesor de barra (w)), y la presión contra la superficie de la reja, que es proporcional a la profundidad de flujo [62].

La cresta del azud y la placa de aceleración pueden ser un perfil en forma de arco ojival o un simple arco circular; el objetivo principal es proporcionar una suave aceleración del flujo y entregarlo tangencialmente a la superficie de la reja en su borde aguas arriba.

La inclinación de las barras juega un papel esencial para la capacidad de la reja. Cada barra está inclinada ligeramente en la dirección aguas abajo, de modo que el borde delantero de la siguiente barra produzca un efecto de corte a una capa delgada del flujo. El ángulo de inclinación más usado es de 5°, pero ángulos de 3 a 6° están también disponibles en el mercado. La separación entre barras puede ser de 1 mm o menos, la figura 1.6 muestra la configuración de los barras de la reja [60].



Figura 1.6. Inclinación y separación de los barras [60].

Algunos de los parámetros de diseño que afectan la capacidad de captación de una reja de efecto Coanda están relacionados con las características geométricas de las barras y las condiciones de operación del flujo.

Las principales características geométricas son: el desnivel de la placa de aceleración, medida desde la cresta del vertedero a la parte superior de la reja (Ha); la altura medida desde el nivel de la superficie del flujo aguas arriba hasta la parte inferior de la placa de aceleración (Hs); el ángulo de inclinación desde el borde superior de la reja (θ o); la curvatura de la reja (θ s) y radio del arco (r) o ancho de reja si es plana y la longitud de la cresta del vertedero (L) (ver figura 1.7).



Figura 1.7. Características, disposición típica, y parámetros de diseño para rejas de efecto Coanda [60].

Las características geométricas de las barras son: la separación entre barra (s); el ancho de barra (w); el ángulo de inclinación de la barra (ϕ); el desplazamiento creado por el ángulo de inclinación de las barras (y_{off}) y el ángulo de ataque o relieve (λ).



Figura 1.8. Vista de cerca de los barras y sus parámetros [63].

Las condiciones de operación hidráulica que afectan el flujo a través de la reja son: la unidad de descarga en la parte superior de la reja (q_{inflow}); el caudal unitario en el pie de la reja (q_{bypass}); el caudal unitario en la superficie de la reja (q_{screen}); y el caudal unitario a través de la ranura (s) de la reja (Δq)

Ecuaciones de Diseño.

Altura efectiva compensada.

Es la altura efectiva que se produce al final de cada barra con respecto a su inmediato anterior, está en función del ángulo ϕ de inclinación de cada barra, generalmente entre 3 y 6 °, el espesor de la barra (s) y su espaciamiento (w).

$$y_{off} = (s + w \cos \phi) \sin \phi \tag{1.26}$$

Coeficientes de diseño.

Coeficiente Ccv.

Es el coeficiente combinado de contracción y velocidad, tiene en cuenta el efecto de la contracción del flujo cuando pasa por las ranuras, considera también que las velocidades no se distribuyen uniformemente y otros efectos del fluido. En [60] se estudió el comportamiento de varios tipos de rejas, como resultado de este estudio planteó la siguiente ecuación para determinar los valores de Ccv.

$$C_{cv} = 0.210 + 0.0109 \left(\frac{R}{W}\right) + 0.00803 (F)$$
(1.27)

Donde Ccv es una función del número de Froude (F), número de Reynolds (R) y del número de Weber (W).

$$C_{cv} = f(F, R, W) \tag{1.28}$$

En [60] se determinó el número de Reynolds usando la velocidad tangencial, medida en el tubo Pitot, considerando el espaciamiento de cada barra de la reja, y para el numero de Weber considero la tensión superficial constante de 0.073 N/m.

$$Re = Vs/v \tag{1.29}$$

$$We = \rho V^2 s / \sigma \tag{1.30}$$

Donde:

Re: número de Reynolds

- V: la velocidad tangente a la superficie de la reja
- s: separación entre barras
- v: viscosidad cinemática
- *p:* densidad del fluido
- *s*: fuerza de tensión de superficie por unidad de longitud (0.073 N/m)

En [63] se evaluó la ecuación planteada en [60], determinando que esta no puede modelar con precisión los casos en los que los valores observados de Ccv eran o muy bajos o muy altos, las desviaciones estándar de los errores relativos, calculados *vs* observados, estuvieron en un orden de 16.5 %, en base a nuevas pruebas de laboratorio estimó la siguiente ecuación para calcular el valor de Ccv.

$$C_{cv} = m_2(\delta + \psi)^2 + m_1(\delta + \psi) + b$$
(1.31)

Donde:

 δ : ángulo de desviación del vector de velocidad que se aproxima a la ranura de la reja.

 ψ : ángulo entre la superficie de la reja y la línea (\overline{AB} ver figura 1.9) que conecta la parte inferior del barra aguas arriba con la parte superior del barra aguas abajo. m₂, m₁, b: coeficientes de la línea de mejor ajuste.



Figura 1.9. Flujo idealizado sobre una ranura de la reja [63].

En la figura 1.11 se observa que el vector de flujo de aproximación *Vr* representa la resultante de la velocidad a través de la cara de la reja y la velocidad perpendicular a la cara de la reja que se obtendría mediante la conversión de la altura de presión asociada con la profundidad de la corriente de velocidad, y $\delta + \psi$ es el ángulo entre *Vr* y la ranura, dependerá del ángulo de inclinación de la barra.

Caudal captado por cada espacio entre barras.

Cuando el flujo se aproxima a la reja, el caudal unitario, q, que cada espacio entre barras capta está representado por la siguiente ecuación:

$$q = C_{d,Total}(s + y_{off})\sqrt{2gE}$$
(1.32)

La energía específica, E, está expresada en términos de la presión hidrostática y del vector de velocidad en cada barrote, esto cuando la reja es plana [60].

$$E = D\cos\theta + \frac{V^2}{2g} \tag{1.33}$$

Cuando la reja es cóncava o convexa de radio *r*, en este caso particular la energía específica describe la aceleración centrifuga del flujo, incrementándose a razón de:

$$\frac{DV^2}{g\,r}\tag{1.34}$$

Por lo tanto, la nueva ecuación de energía para este tipo de rejas es:

$$E = \frac{\alpha V^2}{2g} + D\cos\theta + \frac{V^2 D}{gr}$$
(1.35)

Donde:

q: unidad de descarga

C_{d,Total}: Coeficiente de contracción y velocidad

s: separación entre barras

yoff: desplazamiento creado por el ángulo de inclinación de las barras

E: energía especifica

g: fuerza de gravedad

D: profundidad del flujor: radio de la rejaα: coeficiente de energía

En [64] se realizó un estudio en el que se experimentó con tres configuraciones de rejas inclinadas de auto limpieza estática para la captación de agua y exclusión de peces y residuos de escombros. Para ello utilizó dos rejas con inclinación de 60 grados (una con inclinación de las barras de 5 grados y otra sin inclinación de las barras) y una tercera reja con una inclinación de 50 grados (con inclinación de las barras de 5 grados). Para las tres configuraciones el ancho de barra fue de 0.457m y separación de 1mm. Como resultado obtuvo que la primera configuración fue la que tuvo un mayor porcentaje de caudal captado debido a su mayor inclinación de reja e inclinación de la barra y las pruebas con escombros demostraron que todas las configuraciones eran resistentes a la obstrucción.

En [65] se desarrolló un modelo numérico mediante la ecuación de flujo espacialmente variado con disminución de la descarga para determinar la tasa de flujo a través de una reja de efecto Coanda y la variación de su capacidad de captación en función de los parámetros geométricos de la reja como altura de caída, ancho del barra, separación del barra, ángulo de inclinación del barra, inclinación de la reja y el número de Froude del flujo que transita sobre la reja. Para la elaboración del modelo y su calibración se utilizaron los datos obtenidos de varios tipos de rejas de efecto Coanda con diferentes configuraciones utilizados en laboratorio para evaluar su rendimiento hidráulico. Como resultado obtuvieron que el modelo desarrollado predijo satisfactoriamente el funcionamiento hidráulico de varios prototipos desarrollados probados en laboratorio.

En [60] se desarrolló un modelo computacional para calcular el rendimiento hidráulico de las rejas de efecto Coanda. Mediante pruebas de laboratorio con agua limpia, evaluó las características de descarga de varios tipos de reja y desarrolló una relación para calcular la descarga en función del número de Froude, la energía específica y los números de Reynolds y Weber.

En [66] se realizó la evaluación de una reja de efecto Coanda con separación entre barras de 0.5mm ubicada en un sumidero de aguas lluvias de prueba en Rowlett, Texas entre Junio del 2009 y Marzo del 2011, periodo durante el cual se registró una cantidad de 25500 kg/Km²/año de residuos urbanos y sedimentos que pasaron sobre la reja sin ingresar a ella, de los cuales el 40% estaba conformado de partículas entre 0.5mm y

5mm y 60% de partículas mayores a 5mm de principalmente hierba y escombros. Concluye que la reja de efecto Coanda elimina gran cantidad de metales y otros contaminantes que perjudican la calidad del agua, además de que la unidad no ha requerido mantenimiento durante su funcionamiento. Proporciona la siguiente información de remoción por la reja de efecto Coanda: Escombros y Sedimentos 67%, Arsénico 47%, Cadmio 100%, Cobre 33%, Níquel 39%, Zinc 33% y Coliformes fecales 35%.

En [63] se desarrolló un nuevo modelo matemático para predecir el coeficiente de descarga de la reja de efecto Coanda, en el que el ángulo de ataque y la separación entre barras son parámetros cruciales.

Mediante estudios de laboratorio, en [67] se evaluó la eficiencia de rejas de efecto Coanda para excluir sedimentos, se realizó pruebas tanto para agua limpia como con flujo cargado de sedimento. Se determinó que en el flujo de agua limpia el espaciado de la barra no es un parámetro crítico. La cantidad de flujo a través de una reja y la capacidad de excluir sedimentos están inversamente relacionadas. Las tasas de remoción de sedimentos variaron de 43% a 81% y la reducción del flujo captado debido a la obstrucción alcanzó un valor máximo de 55%.

En [68] se realizó pruebas de laboratorio con rejas de efecto Coanda en un rango de flujo más amplio que el previsto originalmente, desarrolló nuevos experimentos con varios tipos de reja en un canal de pendiente ajustable, de casi horizontal a una inclinación de más de 50 grados. Las nuevas pruebas demostraron que la capacidad de la reja es una función compleja tanto del número de Froude como del número de Weber. Se demostró que el número de Reynolds no tiene un efecto significativo en la capacidad de flujo de la reja, esto significa que el rendimiento de la reja debe ser en gran medida independiente de la temperatura del agua (hasta que las temperaturas bajen lo suficiente para formar hielo).

En [6] se estudió los efectos de la tensión superficial en la capacidad de descarga de las rejas de efecto Coanda, evaluó pequeñas secciones de rejas a escala prototipo en diferentes pendientes, verificando que los coeficientes de descarga están relacionados con los números de Froude y Weber.

1.2.13. Estudio de rejas de fondo con Dinámica Computacional de Fluidos (CFD).

En la presente sección se presenta la recopilación de algunos estudios con rejas de fondo desarrollados con códigos numéricos,

Un complemento muy importante para los trabajos realizados en laboratorio con modelos físicos, es la dinámica computacional de fluidos (CFD). Estos códigos numéricos resuelven los problemas de mecánica de fluidos, proporcionando gran cantidad de datos, mayor rentabilidad, flexibilidad y velocidad que la obtenida con procedimientos experimentales [69]

En [70] se desarrollaron simulaciones numéricas con ANSYS CFX y Flow3D y las compararon con los resultados experimentales obtenidos en [23]; flujo con agua limpia sobre rejas de fondo con barras tipo T con índices de huecos: 0.16, 0.22 y 0.28.

El modelo se simplifica considerando que en el sistema de captación todas las barras longitudinales funcionan de igual forma. Por ello, se consideró la existencia de condiciones de simetría en el plano central de la separación entre barras. En la figura 1.10 se observa que el dominio modelado tiene la barra longitudinal en medio de dos condiciones de simetría.



Figura 1.10. Geometría del dominio del fluido

En la tabla 1.2 se presenta un resumen de los parámetros utilizados para la modelación numérica

Tabla 1.2. Parámetros para la modelación numérica [70]				
Parámetro	ANSYS CFX	Flow 3D		
Modelo de turbulencia	k-ω (SST)	k - ε (RNG)		
Tipo de malla	hexaédrica	hexaédrica		
Tamaño de malla en la reja	4mm	2mm		
Tamaño de malla resto del dominio	8mm	4mm		
Número de elementos	109262	331484		

El perfil de flujo y la capacidad de captación de la reja de fondo son las variables empleadas para la comparación con los datos obtenidos en el modelo físico. ANSYS CFX presenta un perfil de flujo más ajustado a las mediciones de laboratorio que Flow-3D.



Figura 1.11. Perfiles de caudal sobre el centro de la barra con reja horizontal [70]

Finalmente, se comparó el ángulo del vector velocidad del agua recolectada con el plano de la reja, α , medido en el centro del espacio entre barras. En [27] en estudios de laboratorio se determinó que el rango de sen α se encuentra entre 0.5 y 0.7, reduciéndose conforme decrece la profundidad del agua.

Los autores concluyen que ANSYS CFX presentó mayor capacidad para modelar flujos sobre captaciones de fondo. No obstante, para mejorar el conocimiento en esta área es necesario realizar más estudios experimentales, tanto en modelos físicos como en prototipos. Esto permitirá calibrar y validar los códigos CFD. En [71] se comparan las mediciones experimentales realizadas en [23] y las desarrolladas en el laboratorio de hidráulica de la UPTC para flujo de agua limpia y con sedimentos, con modelaciones numéricas realizadas con el software Flow 3D. El tamaño de malla es de 1 mm cerca de la reja y 2 mm en el resto del modelo, con un total de 54 633 elementos, los parámetros utilizados para la modelación numérica son similares a los empleados en [70]. En la figura 1.12 se presenta el perfil de flujo y la capacidad de derivación obtenidos con la modelación numérica y las mediciones de laboratorio.



Figura 1.12: Perfiles de flujo sobre el centro de la barra con reja horizontal[71]



Figura 1.13. Capacidad de derivación del sistema de admisión [71]

El modelo de sedimentos considera dos situaciones: levantamiento y transporte de partículas. El primero tiene lugar en la interfase entre las superficies líquida y sólida y genera el transporte de las partículas cuando el esfuerzo causado por el flujo supera un valor crítico, y, en consecuencia, la cantidad de partículas levantadas del suelo es

proporcional al esfuerzo cortante. El componente de transporte simula el movimiento de las partículas sólidas en el fluido y, además, el modelo incorpora un módulo de accionamiento, que se utiliza para simular el comportamiento de los sólidos cuando fluyen en altas concentraciones. La densidad y la viscosidad del fluido se calculan a partir de la concentración de sedimentos.

Se utilizó arena de diámetro d50 =5 mm, limo de diámetro d50 = 1×10^{-2} mm y una mezcla de ambos materiales en la misma proporción. Se han simulado diferentes concentraciones volumétricas entre el 1 y el 10% al inicio de la reja.

La Figura 1.14 presenta los resultados de la reja con m = 0.16, concentración de la mezcla del 10% y el máximo caudal ensayado (q1 = 198 L/s/m).



Figura 1.14. Capacidad de derivación del sistema de toma considerando diferentes concentraciones de sedimento

En la referencia [72] se presentan los resultados obtenidos al incluir en la modelación numérica (Flow-3D) rejas con barras circulares calibradas utilizando información experimental y recomendaciones de diseño realizadas en [26], [28]. La modelación consideró agua clara y con arrastre de sedimentos. Además de las consideraciones realizadas en [70] y [71], se menciona que el tamaño de malla para reproducir el modelo presentado en [28] fue de 0.025 m. En la figura 1.15 se muestran los perfiles de flujo obtenidos con la modelación numérica para el modelo utilizado en [28]. En general se encontraron buenas aproximaciones para las longitudes L1 y L2 propuestas en [28]; sin

embargo, para los caudales altos, la longitud L1 tiende a ser mayor que los valores experimentales, mientras que L2 presenta valores menores. Los autores consideran que una de las causas podía ser el uso del método FAVOR usado por Flow-3D (para obtener las partes sólidas en el volumen de fluido) que no reproducía adecuadamente la forma circular de las barras por necesitar un tamaño más fino de malla.



Figura 1.15. Perfiles de flujo longitudinales para diferentes caudales, pendiente de reja 20%, m = 0.60. [72]

Para la modelación con sedimentos se utilizó el tipo de arena (d95 = 60 mm) que se menciona en [26], considerando concentraciones volumétricas entre 1% y 5% al inicio de la reja. Se consideraron además tres índices de huecos para la modelación: 0.60, 0.375 y 0.23.

En la figura 1.16 se observa los perfiles de flujo obtenidos con agua clara y considerando concentración volumétrica del 50% de sedimentos. La presencia de material sólido produce un incremento en la profundidad de flujo y por lo tanto también se observa un incremento en las longitudes L1 y L2.



Figura 1.16. Perfiles de flujo longitudinales con agua limpia y 5% de concentración de sedimentos, para q = $1.36 \text{ m}^3/\text{s/m}$, pendiente del 20 % y m = 0.23 [72]

En la referencia [73] se realiza una simulación numérica con el software Flow-3D basándose en el modelo físico estudiado en [4]. Para realizar la simulación dividieron al modelo en tres zonas: la zona aguas arriba, la zona intermedia donde se encuentra la reja y la zona aguas abajo. En la zona intermedia se utilizaron tamaños de malla de 2 mm para obtener resultados más confiables. En los 0.15 m inmediatamente aguas arriba de la reja se emplearon tamaños de malla de 4 mm y en el resto de la zona (2.35 m) se emplearon tamaños de 8 mm. En la zona aguas abajo (0.20 m) se emplearon tamaños de 4 mm.

Flow-3D presenta cinco modelos de turbulencia que pueden aplicarse en las simulaciones: "Single equation", "Standard k- ϵ ", "RNG k- ϵ ", "Prandlt mixing length" y "Large Eddy Simulation". Los autores utilizaron los cinco modelos de turbulencia para compararlos con las mediciones experimentales, encontrando que el modelo que mejores resultados produce es el RNG k- ϵ .

También se estudió el efecto del tamaño de la malla en las simulaciones para la zona intermedia utilizando mallas de 4 mm, 2 mm y 1 mm. Para el primer tamaño los resultados se desviaban de las mediciones experimentales mientras que no se presentaron grandes diferencias para los otros dos tamaños. Sin embargo, el tiempo empleado en la simulación con malla de 1 mm duplicaba el tiempo de simulación de la malla de 2 mm por lo que se escogió este último tamaño para las siguientes simulaciones.

Para estudiar el efecto de la geometría de las barras de las rejas de fondo, se realizaron modelaciones adicionales cambiando el tipo de perfil de barra con las formas que se reproducen en la figura 1.17.



Figura 1.17: Secciones transversales de los perfiles ensayados [73]

En cuanto a capacidad de derivación de caudal, los autores, encontraron que las barras tipo C3, C4 y C6 presentan bajas eficiencias mientras que las barras tipo C7, C8 y C9 tienen altas capacidades de derivación de caudal.

Considerando el comportamiento de la reja, el método constructivo y la facilidad de fabricación de las barras, los autores señalan como "prioritarios" los tipos de reja con barras circulares, prismática con borde superior semicircular y tipo diamante (C2, C3, C7).

Adicionalmente, señalan que las barras circulares debido a su forma redondeada trabajan mejor en presencia de sedimentos mientras que las barras tipo diamante tendrían mayores problemas de oclusión, aunque a este respecto no se presenta evidencia de investigación con sedimentos.

En la referencia [69] se emplea la experiencia adquirida en modelaciones anteriores, en las referencias [49], [67]–[69] se presenta la simulación numérica de rejas de fondo con barras tipo T utilizando el software ANSYS CFX (versión 16.2). En este caso en particular se realizaron simulaciones considerando tres tipos diferentes de modelos de turbulencia: k- ε standard, k- ε (RNG) y k- ω (SST).

Para considerar la interacción agua-aire, se empleó el modelo homogéneo de flujo multifase; en el que la suma de la fracción de volumen de todas las fases debe ser 1.0.

Por simplicidad, consideran que todas las barras que conforman la reja trabajan de forma similar. El dominio de flujo se constituye entonces con tres barras y dos espacios entre barras. Las condiciones de simetría se usan en el plano central de las barras exteriores.

Una vez definido el dominio de flujo, se hizo un análisis de sensibilidad para el tamaño de la malla empleando tres valores: 0.002, 0.004 y 0.008 m, y se determinó que el tamaño adecuado de malla era 0.004 m en función de los resultados obtenidos para profundidad de flujo y longitudes L1 y L2 y comparadas con mediciones de laboratorio realizadas en la UPCT y del tiempo requerido para las simulaciones (unas cinco veces menos que la malla de 0.002 m).

En cuanto a los diferentes modelos de turbulencia empleados, no se encontraron diferencias significativas; sin embargo, en función de estudios previos realizados por los autores, escogen el modelo SST.

Las simulaciones se realizaron considerando cinco caudales específicos y cinco diferentes pendientes longitudinales de reja. En las figuras 1.18 y 1.19 se observan diferentes comparaciones realizadas para perfil de flujo, capacidad de derivación del sistema de captación y coeficiente de descarga variable a lo largo de la reja respectivamente.



Figura 1.18. Perfil de flujo sobre la reja con 30% de pendiente longitudinal [69]



Figura 1.19. Capacidad de derivación para una reja con pendiente longitudinal de 30% [69]

En el caso del perfil de flujo, se analizó además la longitud de reja necesaria para captar un determinado caudal (longitudes L1 y L2), y se encontraron diferencias de alrededor del 1% con respecto a las mediciones de laboratorio. Las diferencias entre resultados aumentan a medida que el caudal de aproximación disminuye.

En el caso de la capacidad de captación, en laboratorio se realizaron mediciones en los primeros 0.50 m de reja en vista que, a partir de esta distancia, la cantidad de flujo es muy pequeña para poder medirla con la precisión necesaria. Adicionalmente, la presencia del fenómeno de tensión superficial debida a la forma de las barras tipo T produce valores de L2 altos a pesar de que aproximadamente el 95% del caudal se capta en las proximidades de L1.

En [74] se realiza la modelación física y numérica utilizando el software Flow-3D del esquema del Túnel de Drenaje Oeste de Isla Hong Kong, propuesto para derivar hacia el mar el flujo de inundaciones que afecta a sectores urbanos y de negocios en la isla. El diseño de esta propuesta consta de un túnel de 10.50 km de largo y 6.5 m de diámetro, alimentado por 34 descargadores a vórtice cuya altura media está alrededor de 80 m ubicados en la cuenca de drenaje. Los sistemas de captación con rejas de fondo se localizan en cursos de agua con fuertes pendientes 40% y flujo supercrítico que alcanza velocidades del orden de 10 m/s. Durante los eventos significativos de tormentas, el flujo arrastra material sólido. El esquema se diseñó para el caudal con período de retorno de 200 años (18 m³/s).

El modelo físico se construyó en plexiglás considerando una escala de Froude de 1:9.5 con respecto al prototipo. El modelo consiste en un canal de aproximación con reja de fondo, galería de captación (que permite el cambio de dirección de flujo a 90°), canal de conexión y el vórtice de descarga como se puede observar en la Figura 1.20. La parte final del canal forma parte de la pared de la galería de captación.



Figura 1.20. Esquema en planta del modelo físico construido [74].

El canal de aproximación tiene una pendiente de 21.8° (1:2.5); mientras que la reja de fondo tiene una pendiente longitudinal de 11.3° (1:5). Para el diseño general se escogieron rejas circulares, aunque también se probaron otras geometrías de reja (tipo diamante, tipo I, cuadrada y trapezoidal). La pared de la galería de captación que continúa desde el canal presenta curvatura.

Las barras circulares tenían 12.1 mm de diámetro y 22.6 mm de separación entre centros (m = 0.465); mientras que las barras tipo diamante eran de 8.4 x 8.4 mm (barras cuadradas) y 23 mm de separación entre centros (m = 0.478). Se realizaron 50 ensayos con un rango de caudal entre 14.6 y 70.5 l/s, en los que se midió el perfil de flujo (utilizando limnímetro) y la concentración de aire.

Como resultado de los ensayos de laboratorio, el autor considera que el comportamiento óptimo se presenta con la reja circular debido a su menor longitud mojada y a la mínima introducción de aire. La simulación numérica de flujo se realizó en el programa Flow-3D para condiciones sin y con reja de fondo; la primera condición permitió analizar y calibrar el comportamiento de la galería de captación. En la Figura 1.23, se puede observar la configuración del mallado.

De manera general, el modelo reproduce la mayoría de las características del flujo como el campo de velocidad, la distribución de presiones y la energía cinética turbulenta; sin embargo, presenta resultados de introducción de aire mayores que los obtenidos en laboratorio.



Figura 1.21. Esquemas de la longitud Lw cuando (a) el flujo ingresa directamente a la galería de captación, y (b) el flujo continúa por el canal hacia una galería de captación [74]



Figura 1.22. Ejemplo de secciones de flujo adherido a la parte inferior de las barras de la reja [74]



Figura 1.23. Configuración de la malla para realizar la modelación numérica: (a) vista en planta; y (b) sección transversal [74]

En [75] se desarrolló un modelo numérico para caracterizar el perfil de flujo sobre sistemas de captación de fondo donde se incluyen características verticales de velocidad, la distribución de presiones no hidrostática, efecto de la curvatura en las líneas de corriente que se supone despreciable y el efecto de la pendiente longitudinal en rejas de fondo.

Para el flujo de salida, la profundidad de flujo se coloca como condición de borde y debe permanecer constante.

Para considerar el flujo con caudal decreciente, se utiliza la ecuación:

$$\frac{dQ}{dx} = -mC_q B\sqrt{2gh} \tag{1.36}$$

Donde *m* es el índice de huecos de la reja y C_q es el coeficiente de descarga para el cual se consideraron expresiones propuestas por otros investigadores.

Los resultados obtenidos con el modelo matemático propuesto se comprobaron con información del modelo de rejas de fondo utilizado en [37] y que contenía condiciones de aproximación supercrítica. La simulación reprodujo correctamente el perfil de flujo para el rango de caudales bajos; mientras que, para caudales medios y altos, la predicción se alejaba ligeramente de los valores experimentales hacia el final de la reja. La máxima diferencia entre los valores calculados y los experimentales era de 3.6%.

También comprobó la validez de los resultados obtenidos con el modelo numérico en flujo con aproximación subcrítica empleando la información del estudio presentado en [23]. La correlación presentaba un error menor al 3.5%.

En [76], se desarrollaron estudios numéricos para el diseño óptimo de una reja separadora de partículas utilizando el efecto Coanda. El estudio evalúa el efecto del radio de curvatura derecho e izquierdo en la parte superior de las barras de la reja.

1.3. Objetivos

En países en desarrollo como Ecuador, la captación de agua superficial con rejas de fondo convencionales, es uno de los métodos que se utiliza con mayor frecuencia especialmente en ríos de montaña con gran cantidad de arrastre de sedimentos. El caudal captado se utiliza principalmente para sistemas de abastecimiento de agua para consumo y riego de pequeñas poblaciones. El principal inconveniente de este tipo de estructuras es el ingreso de sedimentos, sólidos y vida acuática que se produce debido a la disposición y espaciamiento entre barras. Dependiendo del uso del agua, la separación entre barras puede ir desde 2cm hasta 10cm. Los problemas de ingreso de sedimentos de labores de operación y mantenimiento, impactos ambientales especialmente en la fauna acuática, así como el incremento en las dimensiones de obras como desripiadores y desarenadores.

Un tipo de reja no convencional con barras transversales al flujo que se utiliza en la captación de agua superficial con resultados satisfactorios en la separación sólido líquido, es la denominada reja de efecto Coanda. Las fábricas de este tipo de reja se encuentran generalmente en países desarrollados como Estados Unidos y Reino Unido en dónde su uso es común. Al ser una estructura patentada su disponibilidad en países en desarrollo como Ecuador es limitada, razón por la cual su uso es incipiente, a esto se suma la escasa literatura técnica para un adecuado diseño y construcción.

Por lo antes mencionado, la motivación de la presente investigación se centra en el estudio experimental y numérico de rejas no convencionales con barras transversales al flujo con separaciones entre barras del orden de milímetros y altas pendientes. Se estudia una propuesta de reja de efecto Coanda que brinde resultados hidráulicos satisfactorios y que sea accesible para su uso en obras de captación de agua superficial de poblaciones pequeñas. Se busca de alguna manera aportar con conocimiento para su aplicación.

De esta forma en la presente tesis se propone alcanzar los siguientes objetivos:

 Diseñar y construir un dispositivo de laboratorio de pendiente ajustable que permita evaluar mediante experimentación física el rendimiento de prototipos de rejas de barras transversales para condiciones de flujo supercrítico con agua limpia y con presencia de sedimentos. 2) Realizar un estudio paramétrico CFD-2D para evaluar el rendimiento de rejas de fondo transversales bajo condiciones de flujo supercrítico con agua limpia considerando la influencia de parámetros relevantes como: posición a lo largo del canal, inclinación, forma, sección y separación entre barras.

1.4. Estructura de la tesis

La presente tesis está compuesta por cuatro capítulos los cuales se describen a continuación: en el capítulo 2 se presenta la metodología utilizada tanto para la experimentación física como para la numérica. En el capítulo 3 se presentan los resultados y discusión del trabajo. En la primera sección se presentan los resultados de las pruebas realizadas con el modelo físico de laboratorio utilizando agua limpia y con sedimento, incluyendo pruebas de caudal captado y sedimento excluido. En la segunda sección, se presentan los resultados de la evaluación del funcionamiento hidráulico de las rejas mediante un estudio paramétrico CFD-2D, incluye una comparativa de caudales entre el modelo físico y modelo numérico, tendencia de los caudales captados por cada orificio de las rejas, el capítulo 4 presenta las principales conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

Este capítulo presenta los materiales y métodos utilizados para el desarrollo de la investigación. El estudio se desarrolla con una metodología de enfoque cuantitativo de tipo experimental, consta de dos escenarios fundamentales que son la experimentación física y la experimentación numérica.

Las variables dependientes analizadas en la experimentación física son el caudal capturado y el sedimento excluido por cada reja, las variables independientes y que se modifican para determinar su influencia sobre las variables dependientes son: el ángulo del canal, la forma y ancho de las barras y el tamaño de partículas en las pruebas de agua con sedimento.

Para la experimentación física se construye un prototipo de laboratorio similar al utilizado en [68] en el cual se realizan varias pruebas con caudales de agua limpia y con sedimento. Se utilizan rejas con barras de acero inoxidable de tres secciones diferentes, triangular, circular y semicircular, las barras están dispuestas de forma transversal al flujo y tienen una longitud igual al ancho del canal.

La experimentación numérica se realiza en base a los resultados experimentales, el modelo numérico CFD se calibra con los caudales de agua limpia medidos en laboratorio, se continúa con un estudio paramétrico para determinar la influencia de variables geométricas sobre el caudal capturado por cada reja en estudio, las variables que se modifican son el ángulo del canal, la forma y ancho de los barras, la separación entre barras y posición de la reja a lo largo del canal (zona alta, media y baja).

2.1. EXPERIMENTACIÓN FÍSICA

2.1.1. Dispositivo de laboratorio

Para evaluar el funcionamiento hidráulico de las rejas de fondo con barras transversales al flujo, se construyó un prototipo de laboratorio (figura 2.1) que consiste en un canal rectangular prismático de pendiente ajustable, las características geométricas del canal son: longitud 2m; ancho 9.3 cm, rango angular de la pendiente de 20° a 45° respecto a la horizontal.

El sistema cuenta con un tanque cisterna y un sistema de bombeo que permite recircular el caudal, el agua es impulsada hacia un tanque superior que cuenta con un vertedero a través del cual el caudal ingresa al canal rectangular y posteriormente pasa por sobre la reja de barras transversales, una parte del caudal es captado por la reja y otra parte regresa a la cisterna, el flujo de agua que ingresa por la reja es recolectado en otro depósito para su posterior medición.

La reja está ubicada a 1.2 m de distancia del borde superior del canal, esta distancia permite que el sedimento se mezcle con el agua antes de pasar sobre la reja, las pruebas se han realizado tanto para agua limpia como para agua con sedimento.



Figura 2.1. Dispositivo de laboratorio

2.1.2. Rejas

Se elaboraron rejas de acero inoxidable conformadas por barras de tres secciones diferentes, en primer lugar, se utilizó la geometría estándar empleada en rejas de efecto Coanda y estudiada en [68], formada por barras transversales de sección triangular con ángulo de inclinación de 5°. Como alternativas se han propuesto dos rejas con barra de sección semicircular y circular. Las barras de sección triangular y semicircular se mecanizaron con equipo de torno de precisión. En la tabla 2.1 se detallan las características geométricas de cada una de las rejas utilizadas:

Reja	1	2	3
Sección	Triangular	Semicircular	Circular
Ancho de reja (cm)	9.3	9.3	9.3
Ángulo de barra (grados)	5	-	-
Separación entre barras, s (mm)	2	2	2
Ancho de barra, <i>w</i> (mm)	5	5	5
Número de barras	12	12	12
Zona de ubicación en el canal	baja	baja	baja

Tabla 2.1:	Características	geométricas	de las	reias d	e efecto	Coanda	utilizadas
	Ouractoristicas	geometrious	uc ius	rojas a		oounuu	utilizadas

En la figura 2.2 se presenta una imagen de las rejas utilizadas en la experimentación numérica y las características geométricas de las barras:



Figura 2.2. Imagen de rejas utilizadas y características geométricas de sus barras.

En la primera parte de las pruebas físicas, con el fin obtener resultados comparables de caudales y sedimento, se utilizó el mismo ancho de barra para las tres secciones.

Por cuestiones de costo y dificultad de fabricación, las rejas de barra triangular y semicircular no se evaluaron con anchos de barra diferentes a 5mm, caso contrario sucede con la reja de barra de sección circular que presentó facilidad de elaboración debido a la disponibilidad comercial de barras de diferentes diámetros que no necesitan mecanización y pueden utilizarse directamente en la construcción de la reja, en tal sentido y con el fin de evaluar la influencia del diámetro de la barra sobre el caudal capturado y el sedimento excluido, se desarrolló experimentos con dos diámetros adicionales, uno superior y otro inferior al diámetro original, 6.3mm y 3mm respectivamente, en la figura 2.3 se presenta una imagen de las rejas con los nuevos diámetros.



Figura 2.3. Imagen de rejas con barras circulares de 6.3mm (izquierda) y 3mm (derecha)

En la tabla 2.2 se presenta un resumen de las características de las rejas de barra circular que fueron utilizadas en la experimentación física:

Reja circular	а	b	С
Ancho de reja (cm)	9.3	9.3	9.3
Separación entre barras, s (mm)	2	2	2
Ancho de barra, <i>w</i> (mm)	5	6.3	3
Número de barras	12	10	17
Zona de ubicación en el canal	baja	baja	baja

Tabla 2.2. Características geométricas rejas de barra circular

La sección de la abertura en el canal en donde se instala la reja se mantiene para todos los prototipos de reja, por lo que, al modificar el diámetro de las barras el número de
estos aumenta o disminuye dependiendo del ancho de barra, el número de aberturas y el área neta de captación también cambia.

2.1.3. Desarrollo de experimentos

La literatura técnica consultada sobre experimentación física con rejas de fondo, en su mayoría presenta estudios de laboratorio desarrollados con caudales de agua limpia, sin embargo, en la práctica la presencia de sedimento es inevitable por lo que en el presente estudio se realizan pruebas bajo las dos condiciones. Se realizan un total de 81 ensayos de laboratorio, los experimentos físicos se desarrollaron en dos etapas, en la primera etapa se evalúa el funcionamiento de las rejas bajo condiciones de agua limpia para lo cual se desarrollan 9 experimentos, en la segunda etapa se llevan a cabo 72 experimentos con presencia de sedimentos. A continuación, se detalla el procedimiento de cada etapa.

2.1.4. Pruebas de laboratorio con agua limpia

Las pruebas físicas con agua limpia se realizaron con un caudal de 2.5 L/s para todos los casos, para evaluar la influencia de la forma de la barra se utilizaron tres rejas de diferente sección (triangular, semicircular y circular), el ancho de barra para todos los casos fue de 5mm. Otra variable de importancia que se modificó fue la inclinación del canal, esto permitió modificar la velocidad y el tirante de agua sobre la reja, los ángulos de inclinación del canal utilizados fueron de 25, 35 y 45 grados respecto a la horizontal. En la figura 2.4 se presenta un esquema de las pruebas de laboratorio con agua limpia:





En la tabla 2.3 se presenta la matriz de los ensayos de laboratorio realizados con agua limpia:

Reja	Ancho de reja (cm)	Ancho de barra (mm)	Separación entre barras (mm)	Inclinación canal (°)	Zona de ubicación en el canal	Caudal de entrada Q ₁ (L/s)
Triangular	9.03	5	2	20	baja	2.5
Triangular	9.03	5	2	35	baja	2.5
Triangular	9.03	5	2	45	baja	2.5
Semicircular	9.03	5	2	20	baja	2.5
Semicircular	9.03	5	2	35	baja	2.5
Semicircular	9.03	5	2	45	baja	2.5
Circular	9.03	5	2	20	baja	2.5
Circular	9.03	5	2	35	baja	2.5
Circular	9.03	5	2	45	baja	2.5

Los caudales captados por cada reja son medidos con el método volumétrico, la eficiencia de las rejas se determina en función del caudal captado (Δ q) sobre el caudal de entrada (Q1)

En la figura 2.5 se presenta una imagen del flujo de agua limpia sobre la reja de barra triangular



Figura 2.5. Imagen de flujo de agua limpia sobre reja de barra triangular

En la figura 2.6 se presenta una imagen del caudal de agua limpia que ingresa por la reja de barra triangular.



Figura 2.6. Imagen de flujo de agua limpia capturado por reja de barra triangular

En la figura se presenta una toma superior y una toma inferior de la reja de barra circular instalada en el canal.



Figura 2.7. Imagen de reja de barra circular instalada en el canal de laboratorio

En las figuras 2.8 y 2.9 se presentan imágenes de una de las pruebas de laboratorio con flujo de agua limpia que pasa sobre la reja de barra circular y del flujo capturado por la reja.



Figura 2.8. Imagen de flujo de agua limpia sobre reja de barra circular



Figura 2.9. Imagen de flujo de agua limpia captado por reja de barra circular

2.1.5. Pruebas de laboratorio con agua y sedimento

Para evaluar la eficiencia de las rejas en cuanto a exclusión de sedimentos, el dispositivo de laboratorio se modificó para funcionar con tanques de recolección separados (Fig. 2.10). El sedimento se inyectó en el flujo a través de una tolva suspendida sobre la entrada del canal. Una válvula calibrada a la salida de la tolva reguló un flujo constante de sedimentos.



Figura 2.10. Esquema de funcionamiento del modelo físico para las pruebas de agua y sedimento

Las pruebas fueron realizadas con ángulos de inclinación del canal con respecto a la horizontal de 20°, 35° y 45°, un caudal de agua limpia de 2.5 L/s y una carga de sedimento vertida de 25 gr/L. En [67] se menciona que un valor de 25 gr/L es similar al contenido de sedimento de un rio de montaña en donde se utilizan este tipo de rejas. El agua con sedimento ha sido separada del sistema de recirculación ya que la bomba utilizada no está diseñada para trabajar con partículas, para esto tanto el agua captada por la reja como el agua que pasa sobre ella es recolectada en tanques individuales para su posterior medición. Se agregó otro tanque para recolectar el agua con sedimento, el tanque 1 recoge el caudal de agua con sedimento captado por la reja y el tanque 2 almacena el agua con sedimento que pasa sobre la reja. El sedimento que se utiliza es arena de río, las partículas son clasificadas por tamaño según la serie de tamices menores a 2mm como son 1mm, 0.3mm, 0.15mm y 0.063mm (figura 2.11a), se utilizan muestras de similar peso para todos los tamaños de partículas utilizados.



Figura 2.11. Serie de tamices utilizados (a), peso de sedimento (b)

La carga de sedimento es de 315g para cada rango de partículas y para todos los experimentos. En la figura 2.12(a) se muestra el sistema de incorporación de los sedimentos y en la figura 2.12 (b) se presenta una imagen de la muestra de sedimento correspondiente a la carga de 25 gr/L con partículas de 1 a 2mm.



Figura 2.12. Sistema para incorporación de sedimento (a) tolva y válvula, (b) muestra de sedimento.

El caudal de agua que ingresa por la reja se determina con el método volumétrico, la cantidad de sedimento que ingresa por la reja es separada del agua y secada al horno para posteriormente determinar su peso.

2.1.6. Pruebas con sedimento separado

Se realizaron ensayos de laboratorio con sedimento separado con el fin de obtener resultados individuales para cada rango de tamaño de partículas, estas pruebas se desarrollaron para las mismas rejas empleadas en los ensayos con agua limpia, se conservaron también las condiciones de caudal de entrada y ángulos de inclinación del canal.

Se desarrollan un total de 36 pruebas de laboratorio con sedimento separado, la eficiencia de las rejas se determina en función de la relación de caudal y sedimento capturado, un valor menor de esta relación, representa una mayor eficiencia de la reja.

En la tabla 2.4 se presenta una matriz de las pruebas de laboratorio realizadas con agua y sedimento separado.

Tabla 2.4. N	Matriz de pruebas de laboratorio con sedi	mento separado para las rejas de
barras de se	ección triangular, circular y semicircular	

Angulo del canal (°)	Caudal de entrada (L/s)	Carga de sedimento (gr/L)	Tamaño de partículas (mm)	Sedimento total vertido (gr)
		25	>2	315
		25	(2 - 1)	315
20	2.5	25	(1 - 0.3)	315
		25	(0.3 - 0.15)	315
		25	(0.15 - 0.063)	315
		25	>2	315
	2.5	25	(2 - 1)	315
35		25	(1 - 0.3)	315
		25	(0.3 - 0.15)	315
		25	(0.15 - 0.063)	315
		25	>2	315
45	2.5	25	(2 - 1)	315
		25	(1 - 0.3)	315
		25	(0.3 - 0.15)	315
		25	(0.15 - 0.063)	315

2.1.7. Pruebas con sedimento mezclado

De las pruebas de laboratorio con sedimento separado, se determina que la reja de barra circular presenta el mejor rendimiento en cuanto a relación de caudal de agua y sedimento capturado, por tal razón y por cuestiones de costo y facilidad constructiva que presenta la reja circular, con el fin de evaluar la influencia del diámetro de la barra, se elaboran dos rejas adicionales con diámetros de 6.3 y 3mm.

Se realizan 36 ensayos de laboratorio con sedimento mezclado, si bien es cierto las pruebas con sedimento separado permiten obtener resultados individuales por rango de tamaño de partícula, en la práctica el sedimento de un río se presenta con todos los tamaños de sus partículas de sedimento mezcladas, en tal sentido se realizan nuevos ensayos con muestras de sedimento que representen esta situación.

En la tabla 2.5 se presenta una matriz de las pruebas de laboratorio realizadas con agua y sedimento mezclado para las tres rejas de barra circular.

Tabla 2.5. Matr	z de pruebas	de laboratorio	con sedimento	mezclado	para la r	eja de
barras de secció	n circular con	diferentes diár	netros.			_

Diámetro de barra (mm)	Angulo del canal (°)	Caudal de entrada (L/s)	Carga de sedimento (gr/L)	Tamaño de partículas (mm)	Sedimento total vertido (gr)
			25	>2	315
			25	(2 - 1)	315
	20	2.5	25	(1 - 0.3)	315
			25	(0.3 - 0.15)	315
			25	(0.15 - 0.063)	315
2			25	>2	315
3			25	(2 - 1)	315
5	35	2.5	25	(1 - 0.3)	315
6.2				(0.3 - 0.15)	315
0.5	0.3		25	(0.15 - 0.063)	315
			25	>2	315
			25	(2 - 1)	315
	45	2.5	25	(1 - 0.3)	315
			25	(0.3 - 0.15)	315
			25	(0.15 - 0.063)	315

La muestra compuesta de sedimento mezclado se obtiene con la unión de las muestras simples de rangos de partículas, el sedimento total es vertido a través de la tolva y la dosificación es controlada con la válvula correspondiente.

2.2. EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

Junto a la investigación experimental, la metodología de Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) es el segundo método de análisis utilizado en la presente investigación. Los dos métodos se relacionan y se complementan entre sí. La modelación numérica permite el cálculo de variables que son difíciles de medir mediante procedimientos experimentales. En particular para el presente estudio, a través de la experimentación numérica es posible calcular la velocidad y la presión en cada ranura de la reja, así como el efecto generado por la modificación de variables independientes como la inclinación, ubicación de la reja a lo largo del canal, forma y sección de las barras, separación entre barras, etc., evitando costosas modificaciones del montaje experimental.

En la metodología CFD, el flujo de cualquier fluido se resuelve a partir de los siguientes principios y ecuaciones generales de conservación:

- Principio de conservación de la masa: Ecuación de la continuidad.
- Principio de conservación de la cantidad de movimiento o segunda ley de Newton Ecuaciones de Navier-Stokes (si se tienen en cuenta los términos viscosos y de disipación de energía) o ecuaciones de Euler (si se desprecian).
- Principio de conservación de la energía: Ecuación de la energía.
- Ecuación de estado o de comportamiento del fluido.
- Ecuaciones constitutivas del medio.

La resolución de las ecuaciones diferenciales proporciona las tres componentes de velocidad en cualquier punto, para cualquier instante de tiempo *t*, u(x, y, z, t), v(x, y, z, t) *y* w(x, y, z, t), junto con las distribuciones de presión p(x, y, z, t), densidad, p(x, y, z, t) y temperatura, T(x, y, z, t).

Sin embargo, la simulación numérica no puede resolver con éxito problemas en los que los principios físicos no hayan sido formulados de manera correcta, como, por ejemplo, en la simulación de flujos turbulentos, donde se utilizan modelos aproximados que incluyen constantes empíricas. De este modo, los resultados numéricos obtenidos están sujetos a la exactitud del modelo de turbulencia empleado, así como a la conveniencia de la aplicación del modelo al problema concreto que se quiere resolver.

Los modelos matemáticos aún presentan problemas de precisión al modelar algunos fenómenos hidráulicos [77], [78]. Por lo tanto, es necesario validar los resultados numéricos con los datos obtenidos en prototipos o modelos físicos [79].

Los códigos CFD están estructurados en torno a algoritmos numéricos que pueden abordar los problemas de flujo de fluidos. Para proporcionar un fácil acceso a su capacidad de resolución, todos los paquetes comerciales de CFD incluyen interfaces de usuario sofisticadas para ingresar parámetros de problemas y examinar los resultados. Por lo tanto, todos los códigos contienen tres elementos principales: (i) un preprocesador, (ii) método de solución y (iii) un posprocesador. Se analiza brevemente la función de cada uno de estos elementos en el contexto de un código CFD [80].

Preprocesador

El preprocesamiento consiste en la entrada de un problema de flujo a un código CFD por medio de una interfaz gráfica de usuario para su posterior transformación en información adecuada para el método de solución. Las actividades en la etapa de preprocesamiento implican:

- Definición de la geometría de la región de interés o dominio computacional. Es necesario definir los contornos del dominio del problema. Este proceso es relativamente simple cuando el modelo es bidimensional, aunque puede ser complejo cuando el modelo es tridimensional.
- Generación de la malla: subdivisión del dominio en un número de subdominios más pequeños que no se superponen: una cuadrícula (o malla) de celdas (volúmenes de control o elementos). El mallado puede ser estructurado o no estructurado. El mallado estructurado está formado por rectángulos o paralelepípedos ordenados en una matriz, que pueden deformarse para adaptarse a las superficies curvas de la geometría. El mallado no estructurado está habitualmente formado por triángulos o tetraedros y, en cualquier caso, no tiene un orden matricial. Este último tipo de mallado es mucho más sencillo de ajustar a formas complejas que el anterior, aunque es más costoso de calcular.

- Selección de los fenómenos físicos y químicos que necesitan ser modelados.
- Definición de los modelos que se van a utilizar: modelos de turbulencia, de radiación, de flujo multifásico, de multiespecie, etc.
- Definición de las propiedades de los fluidos, viscosidad, densidad, propiedades térmicas, etc.
- Especificación de las condiciones de contorno apropiadas en las celdas que coinciden con el límite del dominio, se definen valores de variables, básicamente se imponen valores fijos de la presión, velocidad y temperatura, o de sus gradientes. Según el modelo de turbulencia que se esté utilizando, se debe imponer condiciones para las variables correspondientes.

La solución a un problema de flujo (velocidad, presión, temperatura, etc.) se define en los nodos dentro de cada celda. La precisión de una solución CFD está gobernada por el número de celdas en la cuadrícula. En general, cuanto mayor sea el número de celdas, mejor será la precisión de la solución. Tanto la precisión de una solución como su costo en términos de hardware informático necesario y tiempo de cálculo dependen del refinamiento de la malla.

Más del 50 % del tiempo empleado en el desarrollo de un proyecto CFD se dedica a la definición de la geometría del dominio y la generación de la malla. Actualmente la mayoría de códigos CFD incluyen su propia interfaz estilo CAD y/o herramientas para importar geometrías de modeladores de superficie externos. Los preprocesadores actuales también brindan acceso a bibliotecas de propiedades de materiales para fluidos comunes y modelos de procesos físicos y químicos especiales (por ejemplo, modelos de turbulencia, transferencia de calor por radiación, modelos de combustión) junto con las principales ecuaciones de flujo de fluidos.

Método de solución

Los códigos CFD utilizan algoritmos numéricos que de forma general desarrollan los siguientes procesos:

- Integración de las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos sobre todos los volúmenes de control (finitos) del dominio

- Discretización: conversión de las ecuaciones integrales resultantes en un sistema de ecuaciones algebraicas
- Solución de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo

Se debe controlar los parámetros que afectan a la resolución numérica del problema. Se puede actuar sobre el proceso iterativo definiendo los tipos de discretización, variando los factores de relajación, y fijando los criterios de finalización de las iteraciones.

Se monitoriza la convergencia y se suele controlar la evolución de las variables en algunos puntos.

Post-procesador

En la actualidad los computadores desarrollados para ingeniería cuentan con excelentes capacidades gráficas, por lo que los principales códigos de CFD están equipados con herramientas versátiles de visualización gráfica de resultados. Estos incluyen:

- Visualización de malla y geometría de dominio
- Gráficos vectoriales
- Gráficos de líneas y contornos
- Gráficos de superficie 2D y 3D
- Seguimiento de partículas
- Manipulación de vistas (rotación, escalado, etc.)

Análisis de la solución. Comprobación de que la resolución es correcta y estudio de los resultados. La gran cantidad de datos generados hace necesario el uso de sistemas de postproceso gráficos.

Ventajas e inconvenientes

Diversas fuentes destacan las siguientes ventajas de la modelación numérica:

- Bajo coste. Por ejemplo, en [81] consideran que el coste de la simulación numérica está en torno al 20 - 25% del coste de un modelo físico.

- Pueden estudiarse configuraciones y variaciones distintas de un mismo problema con un tiempo de cálculo relativamente corto. Generalmente, resulta sencillo cambiar geometrías y condiciones de contorno.
- La solución ofrece una información completa y detallada sobre el dominio de interés, mientras que en la experimentación física sólo es posible obtenerla en unos pocos puntos.
- Las condiciones reales se implementan de una forma relativamente sencilla, de modo que pueden simularse problemas complejos que en la experimentación física deberían tener que simplificarse para lograr mediciones fiables.

Una causa común de los errores de los modelos es de tipo numérico. Se trata de una pérdida de precisión debido al modo en que los paquetes de CFD resuelven las ecuaciones, que es especialmente peligroso cerca de las condiciones de contorno del mallado. Según [82], los errores numéricos que reducen la precisión de los resultados pueden ser debidos a:

- La discretización del espacio y del tiempo.
- Soluciones implícitas que no convergen, en especial para la presión.
- Pérdida de precisión debida a redondeos.
- Inadecuada o inexacta geometría. En geometrías complejas los costos computacionales pueden ser del mismo orden que los costes experimentales.
- Condiciones de contorno incorrectas o incompatibles.
- Errores del usuario en parámetros que afectan a la resolución numérica del problema.
- Simplificaciones y aproximaciones en modelos, especialmente las relacionadas con cierres de la turbulencia, flujos multifásicos, etc. En estos casos para los que no se ha desarrollado un modelo matemático fiable, es posible estar simulando un fenómeno que no ocurre en la realidad física, por lo que se requiere la comparación de los resultados numéricos con datos experimentales semejantes para validar la solución numérica.
- Errores en el código implementado en el paquete de CFD.

Para la experimentación numérica del presente estudio se utilizó el código de simulación numérica CFD ANSYS 2020 R1, este software integra en una sola plataforma de trabajo las fases de pre-proceso, método de solución y post-proceso, la plataforma se denomina ANSYS Workbench.

El procedimiento utilizado para el desarrollo de la experimentación numérica del presente estudio es el siguiente:

Construcción de la geometría Discretización Condiciones de contorno Configuración de los parámetros de simulación numérica Validación Estudio paramétrico CFD 2D Análisis de los resultados

2.2.1. Geometría

Para generar las geometrías 2D se utilizaron técnicas de diseño asistido por computadora, se extrajo los dominios que comprenden el vertedero, el canal y la reja del modelo físico utilizado en [68]; así como de las geometrías del vertedero, el canal y las rejas de barras de secciones triangular y circular del prototipo de laboratorio de la presente investigación. El software específico utilizado en esta fase es ANSYS Desing Modeler Geometry.

La geometría del canal y la reja A5 del prototipo utilizado en [68] se presenta en la figura 2.13.



Figura 2.13. Dominio extraído de prototipo utilizado en [68], (a) Geometría de vertedero y canal, inclinación 26.3°; (b) reja Coanda A5

El detalle de la disposición y características de las variables geométricas de las barras del prototipo A5 utilizado en [68] se presentan en la figura 2.14 y en la tabla 2.6.



Figura 2.14. Variables geométricas reja de barra triangular

Reja	A5
Ángulo de ataque (λ°)	10
Ancho de barra, w (mm)	4.7167
Separación entre barras, s (mm)	1.985
Ángulo de barra, φ	5.25
Inclinación de reja θ°	26.3
Zona de ubicación en el canal	baja

, . .

Para el caso del vertedero y el canal del prototipo de laboratorio utilizado en la experimentación física de la presente investigación, se realizaron 3 geometrías, una para cada ángulo de inclinación, 20, 35 y 45 grados. En la figura 2.15 se presentan las geometrías de los vertederos y canales generados.







(**b**)



Figura 2.15. Dominios de vertedero y canal extraídos de prototipo de laboratorio: (a) 20°; (b) 35°; (c) 45°

Geometría de rejas de barras de sección triangular

Las geometrías de todas las rejas fueron generadas con un mismo número de barras, independientemente de la forma y el ancho de barra, se generaron 12 elementos, esto permitió obtener resultados comparables entre todas las simulaciones.

Por cada variable geométrica que se modificó en una barra, se requirió una geometría específica de reja, para las rejas de barras de sección triangular las variables geométricas que se modificaron son las siguientes:

Variable	valor
Inclinación de reja (°)	20, 35, 45
Ancho de barra (mm)	3, 5, 6.3
Separación entre barras (mm)	1, 2
Zona de ubicación a lo largo del canal	Alta, media, baja

Tabla 2.7. Características geométricas de rejas de barras de sección triangular

Se generaron 56 geometrías para las rejas de barra de sección triangular, en la figura 2.16 se presentan algunos ejemplos:



(**a**)



(**b**)



(**c**)

Figura 2.16. Geometría de reja de barras de sección triangular de 5mm de ancho, separación entre barras 2mm: (a) 20°; (b) 35°; (c) 45°.

Geometría de rejas de barras de sección circular

Para las rejas de barras de sección circular las variables geométricas que se modificaron son las siguientes:

Variable	valor
Inclinación de reja (°)	20, 35, 45
Diámetro de barra (mm)	3, 5, 6.3, 10,12,14, 16, 20
Separación entre barras (mm)	1, 2
Zona de ubicación a lo largo del canal	Alta, media, baja

Se generaron 108 geometrías para las rejas de barra de sección circular. Para tener mejor control del mallado sobre las superficies curvas, se dividió la geometría en 16 partes, en la figura 2.17 se presentan algunos ejemplos:







(b)



Figura 2.17. Geometría de reja de barras de sección circular de 5mm de diámetro, separación entre barras 2mm: (a) 20°; (b) 35°; (c) 45°.

2.2.2. Discretización

La discretización de los dominios y la generación de mallas se realizó con el código de mallado de propósito general ANSYS Meshing, este software permite generar mallas de alta calidad, se puede realizar mallados de forma automática con variables y configuraciones establecidas por defecto o mallas altamente elaboradas con mayor detalle y control, el mallado automático puede resultar útil en casos en que las geometrías son simples y en los que el refinamiento en zonas específicas no es relevante. Para los fines de la presente investigación, la calidad de mallado y el refinamiento en zonas concretas, es un componente de mucha importancia que determina la calidad de los resultados.

Los caudales simulados en las rejas, demostraron una alta sensibilidad a la calidad del mallado, por tal razón las mallas se generaron con un procedimiento controlado, para ello las geometrías fueron divididas en sub dominios, cada parte se malló de forma independiente conservando la conformidad entre submallas y obteniendo al final una sola malla. El modelo permite realizar mallas estructuradas, no estructuras y la

combinación de estas. Las mallas estructuradas tienen la ventaja que el acoplamiento con la celda vecina resulta muy fácil, debido a que es una malla organizada y la probabilidad de que las caras de las celdas coincidan es alta, por otro lado, las mallas estructuradas no se adaptan a geometrías complejas, es ahí donde toman importancia las mallas no estructuradas. A pesar de que el acople entre las celdas de una malla no estructurada resulta ser más difícil, estas mallas son versátiles y permiten mallar cualquier geometría.

Combinar mallas estructuradas y no estructuradas depende del caso específico de estudio, esta combinación resulta útil cuando existe una geometría compleja, en algunas zonas se puede usar una malla estructurada, esto reduce el costo computacional. Para abordar el mallado del canal y el vertedero se utilizaron mallas estructuradas, para el mallado de las rejas de barras de sección triangular y sección circular se utilizaron mallas combinadas.

A partir de la geometría de los dominios presentados en la sección anterior, se generaron las mallas correspondientes de forma independiente para cada variable modificada, la calibración del modelo se produjo a partir de un análisis de sensibilidad basado en la independencia del tamaño de malla. El refinamiento se llevó a cabo hasta que los resultados del flujo capturado por las mallas fueron similares a los medidos en el modelo físico. Se utilizaron elementos cuadriláteros con tamaños de celdas que varían de 0.3 mm en el canal a 0.04 mm en las barras.

En la figura 2.18, como ejemplo se presenta la malla generada para el dominio del vertedero y el canal a 35 grados de inclinación, se han definido 150 divisiones en la altura del canal y un tamaño de elemento de 0.3mm, el número de elementos generados es de 686700. En la figura 2.18a se presenta un acercamiento de la malla en la zona del vertedero y en la figura 2.18b un detalle de la malla cerca de la pared del canal.



(a)







(**c**)

Figura 2.18. Malla del vertedero y canal, (a) malla general, (b) detalle de malla en la zona del vertedero; (c) detalle de malla en la zona cerca de la pared del canal

En la figura 2.19 se presenta un ejemplo de una malla de barra de secciones triangular y circular, con un número total de elementos es de 544526 y 627855 respectivamente. El ancho de las barras es de 5 mm con una separación de 2 mm, el grosor de la primera capa fue de 0.04 mm y el tamaño de la malla máximo y mínimo fue de 0.1 mm y 0.04 mm.





(**b**)



(**d**)

Figura 2.19. Mallas de rejas, (a-b) barras de sección triangular; (c-d) barras de sección circular

Calidad del mallado.

Para el mallado CFD, el software ANSYS FLUENT, emplea un criterio de revisión de forma basado en la relación de aspecto, volumen del elemento y ángulo de las caras. El criterio "oblicuidad" (skewness) es uno de los principales métodos para establecer la calidad de un mallado. Este cataloga la simetría y la oblicuidad de los elementos [66]. La tabla 2.9 muestra el rango de los valores de oblicuidad y su correspondiente interpretación de calidad del elemento. Considerando el concepto de oblicuidad, éste indica un valor de 0 para un elemento equilátero perfecto, y 1 para definir a un elemento completamente degenerado.

Tabla	a 2.9: Valores de oblicu	iidad y calidad de elementos
	Valor de oblicuidad	Calidad del elemento
1 0.9 - <1 0.75 - 0.9 0.5 - 0.75 0.25 - 0.5 >0 -0.25		Degenerado
		Muy malo
		Pobre
		Regular
		Bueno
		Excelente
	0	Equilátero perfecto

****/ I

Para asegurar la confiabilidad de los resultados, en todas las mallas se realizó la evaluación de la calidad de mallado, en la figura 2.20 se presenta un ejemplo de los resultados de evaluación de la calidad de malla con el criterio de oblicuidad.





En la figura 2.20 se observa que todos los elementos se encuentran entre 0 y 0.01, definiéndose la calidad de mallado como excelente.

2.2.3. Condiciones de cálculo

Límite de Fluidos.

Un límite de fluido es una superficie externa de un dominio de fluido y se dan las siguientes condiciones de borde:

- Entrada (Inlet) El fluido predominantemente fluye hacia el dominio.
- Salida (Outlet) El fluido predominantemente fluye fuera del dominio.
- Apertura (Opening) El fluido puede fluir de forma simultánea tanto dentro como fuera del dominio.
- Pared (Wall) Límite impenetrable al flujo de fluido.
- Plano simétrico (Symmetry) Plano simétrico de geometría y flujo



Figura 2.21. Condiciones de borde [83]

Límite de sólidos.

Un límite sólido es una superficie externa del dominio y tiene las siguientes condiciones de borde:

- Pared (Wall) Límite impenetrable al flujo de fluido.
- Plano simétrico (Symmetry) Plano simétrico de geometría y flujo.

Condiciones de borde e iniciales

Para que la solución de las ecuaciones del movimiento esté bien planteada, se requiere incluir las condiciones de borde e iniciales. Cuando en las simulaciones se consideran problemas estacionarios (en este caso, caudal constante), la condición inicial se elige de forma que la convergencia al estado estacionario final sea rápida. En las simulaciones realizadas, las condiciones iniciales adoptadas son:

- El caudal de ingreso al canal es de 26.833 Kg/s, este valor se mantiene constante para todas las simulaciones.
- La velocidad del flujo de agua limpia al inicio de la reja es variable, depende de la posición de la reja a lo largo del canal y del ángulo de inclinación.
- Los valores de velocidad, presión y fase para la condición inicial de entrada de la reja se obtienen por interpolación a partir de los resultados de las simulaciones del flujo sobre el canal.

La tabla 2.10 presenta un resumen de las propiedades de los fluidos utilizados

Tabla 2.10 Propiedades de los fluidos			
Propiedad	Phase 1	Phase 2	
Material	aire	Agua	
Densidad (kg/m ³)	1.225	998.2	
Viscosidad dinámica (kg/ms)	1.7894e-05	0.001003	
Coeficiente de tensión superficial (N/m)		0.072	

Respecto a las condiciones de borde, en la tabla 2.11 se presenta un resumen de las condiciones utilizadas para la experimentación numérica.

Tabla 2.11 Condiciones de borde aplicadas.		
Contorno	Condición de contorno	
Pared	No-slip	
Entrada en canal	mass flow inlet	
Entrada en reja	velocity-inlet	
Salida	pressure-outlet	
Atmósfera	pressure-outlet	

La simulación del flujo en el canal se realiza sin presencia de reja, esto permite obtener un flujo estacionario sin interferencia. Una vez que el perfil de flujo se estabiliza y converge, los perfiles de velocidad, presión y fase perpendiculares a la pared del canal en cualquier posición pueden obtenerse por interpolación.

En las simulaciones del vertedero y canal, se generaron perfiles en 3 zonas, superior, media e inferior, con alturas de carga de 15, 35 y 70 cm, respectivamente. Estas alturas se midieron desde la cresta del vertedero hasta la primera ranura de la reja. El dominio del vertedero y canal se generó con tres ángulos diferentes, 20, 35 y 45 grados. El dominio de la reja utilizó la información obtenida en cada perfil de canal. De esta forma se evaluó el funcionamiento hidráulico en función de la velocidad y profundidad del agua. Simultáneamente, se obtuvieron valores de caudal independientes para cada ranura.

En las figura 2.22, 2.23 y 2.24 se presentan las condiciones de contorno aplicadas al canal y a las rejas con barras de sección triangular y circular.



Figura 2.22. Condiciones de contorno aplicadas en el canal



Figura 2.23 (a). Condiciones de contorno aplicadas en la reja de barras de sección triangular



Figura 2.23 (b). Condiciones de contorno aplicadas en las barras de sección triangular



Figura 2.24 (a). Condiciones de contorno aplicadas en la reja de barras de sección circular



Figura 2.24 (b). Condiciones de contorno aplicadas en las barras de sección circular

2.2.4. Métodos de resolución numérica

Para simular la superficie libre del fluido y la hidrodinámica local de la reja de fondo de barras transversales al flujo, se utiliza el software de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) – ANSYS FLUENT 2020 R1, este código está basado en el método de volumen finito. Luego de la discretización de toda la región del flujo en celdas computacionales, FLUENT resuelve las ecuaciones gobernantes discretizadas para brindar la información del flujo en cada barra y ranura de la reja en estudio. La simulación CFD proporciona una alternativa al modelo físico para estudiar la influencia de variables geométricas que son complejas y costosas de evaluar de forma experimental; también sirve de ayuda para interpretar los resultados de los experimentos del modelo físico. FLUENT incluye un preprocesador, un método de solución y un posprocesador. El preprocesador, permite construir la geometría sólida y crear la malla del dominio computacional. El generador de mallas discretiza el dominio computacional en celdas en forma de cuadriláteros. El posprocesador puede generar los resultados calculados en formato de texto, figura y animación.

Todas las simulaciones se realizaron con las configuraciones pre establecidas del método de solución de Fluent, una de las preconfiguraciones es el modelo de transporte de esfuerzo cortante (SST) *k-w* presentado en [84], este modelo fue desarrollado para combinar de manera efectiva la formulación robusta y precisa del modelo *k-w* en la región cercana a la pared, con la independencia de flujo libre del modelo k- ϵ en el campo lejano. Se realizaron simulaciones con otros modelos como el laminar y k- ϵ , sin embargo, los resultados más consistentes con lo de laboratorio fueron los obtenidos con el modelo (SST) *k-w*.

En el presente estudio se utiliza el método de volumen de fluido (VOF) para considerar los efectos de la superficie libre del agua [85]. El modelo VOF puede modelar dos o más fluidos inmiscibles resolviendo un solo conjunto de ecuaciones de momento y rastreando la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio.

En ANSYS FLUENT, el modelo VOF no está disponible con el método de solución basado en densidad, se debe utilizar el método de solución basado en la presión. Todos los volúmenes de control deben llenarse con una sola fase de fluido o una combinación de fases. El modelo VOF no permite regiones vacías donde no hay líquido de ningún tipo presente.
La formulación VOF en ANSYS FLUENT generalmente se usa para calcular una solución dependiente del tiempo, sin embargo, también es posible emplear el modelo en problemas en los que solo se requiere una solución de estado estacionario, como es el caso del presente estudio.

Para las discretizaciones espaciales y temporales, se utilizan esquemas de advección de alta resolución de segundo orden.

En la tabla 2.12 se presenta un resumen de los esquemas numéricos y métodos de solución empleados en la experimentación numérica.

Tabla 2.12. Esquemas numéricos y métodos de solución. [83]				
Esquema/modelo				
k-ω SST				
Coupled				
Least Squares Cell-Based				
Body Force Weighted				
Second-order upwind				
Compressive				
Second-order upwind				
Second-order upwind				
Standard				

2.2.5. Validación

La validación del modelo matemático se realiza en base a los resultados de dos trabajos de laboratorio realizados con agua limpia, el primero de ellos, presentado en [68], sirve de base para la validación inicial, se utiliza la información proporcionada por el autor a través de comunicación personal, se realiza la simulación numérica y se valida con los resultados de laboratorio de uno de los casos del prototipo de reja denominado A5.

En la tabla 2.13 se presenta un resumen de las características del experimento realizado con el prototipo A5 [68].

Tabla 2.13. Características y condiciones de prototipo A5					
Reja	A5				
Ángulo de ataque (λ°)	10				
Ancho de reja (cm)	5.08				
Ancho de barra, w (mm)	4.7167				
Ancho de ranura, s (mm)	1.985				
Ángulo de barra, φ	5.25				
Ranuras descartadas	5				
Ranuras utilizadas para el test	6				
Inclinación de reja θ°	26.3				
Zona de ubicación en el canal	baja				
Distancia desde la cresta del vertedero hasta la primera ranura (mm)	1094.978				
Condiciones en la cresta del vertedero (tirante crítico) (mm)	58.80				
Caudal de entrada(L/s)	2.2684				
Caudal capturado por la reja (L/s)	0.487				

Las variables geométricas indicadas en la tabla 2.13 se utilizaron para generar la geometría de los dominios computacionales del canal y la reja. Las variables profundidad crítica y caudal de entrada se utilizaron en la condición de entrada del canal. El caudal captado corresponde a las seis ranuras consideradas para el estudio. El valor de la tasa de flujo se utilizó para comparar los resultados de laboratorio con los resultados de CFD. Una vez que se validó la simulación, se calculó y comparó los caudales de cuatro casos probados en el prototipo experimental: dos rejas de barra de sección triangular y dos rejas de barra de sección circular. En una segunda etapa de la validación, se utilizan parte de los resultados obtenidos en la experimentación física de la presente investigación. Se simulan y validan los resultados de 4 casos, 2 rejas de barras de sección triangular y 2 rejas de barras de rejas de sección circular.

2.2.6. Estudio paramétrico CFD 2D

Una vez que el modelo numérico ha sido validado, es posible realizar un estudio paramétrico CFD en 2 dimensiones que permita evaluar la influencia que tiene sobre el caudal capturado la modificación de variables geométricas relevantes como la inclinación del canal, posición de las rejas a lo largo del canal (zonas alta, media y baja), forma y ancho de las barras, separación entre barras. El estudio paramétrico se realiza para flujo con agua limpia con caudal constante de 2.5 L/s, se emplean barras de sección triangular y circular, independientemente del tamaño y forma de la barra, la experimentación numérica se realiza con rejas de 12 barras en todos los casos, esto permite obtener resultados de caudales comparables. El ángulo de las barras de sección triangular respecto a su eje es de 5°. Las rejas tienen un ancho igual al del canal, 9.3cm.

En la tabla 2.14 se presenta la matriz de casos realizados en la experimentación numérica.

Caso #	Reja	Ancho de barra (mm)	Ancho de ranura (mm)	Ángulo canal (°)	Zona de prueba
1	T-1	3	1	20	Alta
2	T-1	3	1	20	Media
3	T-1	3	1	20	Baja
4	T-1	3	1	35	Alta
5	T-1	3	1	35	Media
6	T-1	3	1	35	Baja
7	T-1	3	1	45	Alta
8	T-1	3	1	45	Media
9	T-1	3	1	45	Baja
10	T-2	5	1	20	Alta
11	T-2	5	1	20	Media
12	T-2	5	1	20	Baja
13	T-2	5	1	35	Alta
14	T-2	5	1	35	Media
15	T-2	5	1	35	Baja
16	T-2	5	1	45	Alta
17	T-2	5	1	45	Media
18	T-2	5	1	45	Baja
19	T-3	6.3	1	20	Alta
20	T-3	6.3	1	20	Media

Tabla 2.14. Matriz de casos de estudio paramétrico CFD – 2D

Caso #	Reja	Ancho de barra (mm)	Ancho de ranura (mm)	Ángulo canal (°)	Zona de prueba
21	T-3	6.3	1	20	Baia
22	T-3	6.3	1	35	Alta
23	T-3	6.3	1	35	Media
24	T-3	6.3	1	35	Baia
25	T-3	6.3	1	45	Alta
26	T-3	6.3	1	45	Media
27	T-3	6.3	1	45	Baja
28	T-4	3	2	20	Alta
29	T-4	3	2	20	Media
30	T-4	3	2	20	Baja
31	T-4	3	2	35	Alta
32	T-4	3	2	35	Media
33	T-4	3	2	35	Baja
34	T-4	3	2	45	Alta
35	T-4	3	2	45	Media
36	T-4	3	2	45	Baja
37	T-5	5	2	20	Alta
38	T-5	5	2	20	Media
39	T-5	5	2	20	Baja
40	T-5	5	2	35	Alta
41	T-5	5	2	35	Media
42	T-5	5	2	35	Baja
43	T-5	5	2	45	Alta
44	T-5	5	2	45	Media
45	T-5	5	2	45	Baja
46	T-6	6.3	2	20	Alta
47	T-6	6.3	2	20	Media
48	T-6	6.3	2	20	Baja
49	T-6	6.3	2	35	Alta
50	T-6	6.3	2	35	Media
51	T-6	6.3	2	35	Baja
52	T-6	6.3	2	45	Alta
53	T-6	6.3	2	45	Media
54	T-6	6.3	2	45	Baja
55	C-1	3	1	20	Alta
56	C-1	3	1	20	Media
57	C-1	3	1	20	Baja
58	C-1	3	1	35	Alta
59	C-1	3	1	35	Media
60	C-1	3	1	35	Baja

Caso #	Reja	Ancho de barra (mm)	Ancho de ranura (mm)	Ángulo canal (°)	Zona de prueba
61	C-1	3	1	45	Alta
62	C-1	3	1	45	Media
63	C-1	3	1	45	Baja
64	C-2	5	1	20	Alta
65	C-2	5	1	20	Media
66	C-2	5	1	20	Baja
67	C-2	5	1	35	Alta
68	C-2	5	1	35	Media
69	C-2	5	1	35	Baja
70	C-2	5	1	45	Alta
71	C-2	5	1	45	Media
72	C-2	5	1	45	Baja
73	C-3	6.3	1	20	Alta
74	C-3	6.3	1	20	Media
75	C-3	6.3	1	20	Baja
76	C-3	6.3	1	35	Alta
77	C-3	6.3	1	35	Media
78	C-3	6.3	1	35	Baja
79	C-3	6.3	1	45	Alta
80	C-3	6.3	1	45	Media
81	C-3	6.3	1	45	Baja
82	C-4	10	1	20	Alta
83	C-4	10	1	20	Media
84	C-4	10	1	20	Baja
85	C-4	10	1	35	Alta
86	C-4	10	1	35	Media
87	C-4	10	1	35	Baja
88	C-5	12	1	20	Alta
89	C-5	12	1	20	Media
90	C-5	12	1	20	Baja
91	C-5	12	1	35	Alta
92	C-5	12	1	35	Media
93	C-6	14	1	20	Alta
94	C-6	14	1	20	Media
95	C-6	14	1	35	Alta
96	C-6	14	1	35	Media
97	C-6	14	1	35	Baja
98	C-7	16	1	20	Alta
99	C-7	16	1	20	Media
100	C-7	16	1	20	Baja

Caso #	Reia	Ancho de barra	Ancho de ranura	Ángulo canal	Zona de
		(mm)	(mm)	(°)	prueba
101	C-7	16	1	35	Alta
102	C-7	16	1	35	Media
103	C-8	20	1	20	Alta
104	C-8	20	1	20	Media
105	C-8	20	1	20	Baja
106	C-8	20	1	35	Alta
107	C-8	20	1	35	Media
108	C-9	3	2	20	Alta
109	C-9	3	2	20	Media
110	C-9	3	2	20	Baja
111	C-9	3	2	35	Alta
112	C-9	3	2	35	Media
113	C-9	3	2	35	Baja
114	C-9	3	2	45	Alta
115	C-9	3	2	45	Media
116	C-9	3	2	45	Baja
117	C-10	5	2	20	Alta
118	C-10	5	2	20	Media
119	C-10	5	2	20	Baja
120	C-10	5	2	35	Alta
121	C-10	5	2	35	Media
122	C-10	5	2	35	Baja
123	C-10	5	2	45	Alta
124	C-10	5	2	45	Media
125	C-10	5	2	45	Baja
126	C-11	6.3	2	20	Alta
127	C-11	6.3	2	20	Media
128	C-11	6.3	2	20	Baja
129	C-11	6.3	2	35	Alta
130	C-11	6.3	2	35	Media
131	C-11	6.3	2	35	Baja
132	C-11	6.3	2	45	Alta
133	C-11	6.3	2	45	Media
134	C-11	6.3	2	45	Baja
135	C-12	10	2	20	Alta
136	C-12	10	2	20	Media
137	C-12	10	2	20	Baja
138	C-12	10	2	35	Alta
139	C-12	10	2	35	Media
140	C-12	10	2	35	Baja

Caso #	Reja	Ancho de barra (mm)	Ancho de ranura (mm)	Ángulo canal (°)	Zona de prueba
141	C-13	12	2	20	Alta
142	C-13	12	2	20	Media
143	C-13	12	2	20	Baja
144	C-13	12	2	35	Alta
145	C-13	12	2	35	Media
146	C-14	14	2	20	Alta
147	C-14	14	2	20	Media
148	C-14	14	2	20	Baja
149	C-14	14	2	35	Alta
150	C-14	14	2	35	Media
151	C-15	16	2	20	Alta
152	C-15	16	2	20	Media
153	C-15	16	2	20	Baja
154	C-15	16	2	35	Alta
155	C-15	16	2	35	Media
156	C-16	20	2	20	Alta
157	C-16	20	2	20	Media
158	C-16	20	2	20	Baja
159	C-16	20	2	35	Alta
160	C-16	20	2	35	Media

En la tabla 2.14 se detallan las características geométricas utilizadas para el canal y las rejas. Se han utilizado 22 prototipos, 6 rejas de barras sección triangular (T) y 16 rejas de barras de sección circular (C). Las características del canal corresponden al dispositivo de laboratorio del presente estudio, el ancho del canal es constante en toda su longitud. En total se realizaron 160 simulaciones numéricas, 54 casos con rejas de barras de sección triangular y 106 casos con rejas de barras de sección circular, el ancho de las barras se seleccionó en base a la serie de diámetros disponibles comercialmente, se utilizaron dos anchos de ranura o separación entre barras (2mm y 1mm). La inclinación de las barras respecto a su eje solamente aplica para las de sección triangular. Todas las rejas se evaluaron para tres inclinaciones del canal, 20, 35 y 45 grados. Cada reja se avaluó en tres posiciones diferentes a lo largo del canal, en la tabla estas posiciones se denominan zonas (alta, media y baja), la zona alta corresponde a una altura de carga de 15 cm medida desde la cresta del vertedero hasta la primera barra de la reja, las zonas media y baja tienen cargas de 35 y 70 cm respectivamente. El caudal de entrada al canal es constante, 2.5 L/s. Los resultados de los casos listados en la tabla 2.14 se discuten y comentan en la sección 3.2.3.2 y 3.2.3.3.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en la experimentación física y en la experimentación numérica. El número de variables y experimentos que se realizaron en el modelo físico fueron limitados, debido principalmente al costo que conlleva realizar modificaciones en el canal y las rejas. La experimentación numérica con agua limpia, complementa la experimentación física y permite ampliar el rango de variables y experimentos.

Los resultados de laboratorio fueron utilizados para validar las simulaciones CFD, una vez calibrado el modelo numérico, se realiza un estudio paramétrico CFD en 2 dimensiones con el cual se evalúa la influencia de variables geométricas del canal y de las rejas.

3.1. EXPERIMENTACIÓN FÍSICA

Los resultados de la experimentación física obtenidos con el dispositivo de laboratorio y los prototipos de rejas de barras transversales al flujo descritas en el capítulo 2, se presentan a continuación. Los ensayos de laboratorio se desarrollaron en dos etapas, en la primera se realizaron experimentos con agua limpia y en la segunda con agua y sedimentos.

3.1.1. Experimentos con agua limpia

Los experimentos con agua limpia se realizaron con un caudal de entrada constante de 2.5 L/s. Los tres prototipos de reja se evaluaron bajos las mismas condiciones de caudal y ángulos de inclinación del canal. Cada reja se instaló y evaluó en la zona baja del canal, esta posición se mantuvo constante en todos los experimentos físicos. La inclinación ajustable del canal permitió modificar el ángulo de inclinación de la reja, con esto se logró variar indirectamente el tirante y la velocidad del flujo. Los caudales totales capturados por las 12 ranuras de cada reja fueron determinados con el método volumétrico. En el modelo físico no fue posible obtener resultados individuales para cada ranura. Para todas las rejas se utilizó un ancho de barra de 5mm y ranura de 2mm, por lo que los resultados de caudal capturado son influenciados principalmente por la forma de la barra y el ángulo de inclinación del canal. En la tabla 3.1 se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio con agua limpia.

Tabla 3.	Tabla 3.1. Resultados de pruebas de laboratorio con agua limpia						
	Sección de	Ángulo de	Caudal de	Caudal			
Reja #	Sección de	canal	entrada	captado por			
	Dalla	(°)	Q1 (L/s)	la reja (L/s)			
		20	2.5	0.81			
1	Triangular	35	2.5	1.11			
		45	2.5	1.1			
		20	2.5	0.51			
2	Circular	35	2.5	0.54			
		45	2.5	0.46			
		20	2.5	0.78			
3	Semicircular	35	2.5	0.92			
		45	2.5	0.83			

Las rejas de sección triangular, circular y semicircular tienen anchos de barra y ranura nominalmente iguales, sin embargo, los resultados de la tabla 3.1 demuestran que tienen capacidades de flujo significativamente diferentes. En base a los experimentos realizados, las diferencias sistemáticas en la capacidad de captación de las rejas pueden asociarse a los parámetros de geometría y ángulo inclinación.

Los caudales medidos demuestran que la reja de barras de sección triangular es más eficiente en cuanto a caudal de agua limpia capturado, seguido de la reja de barras de sección semicircular y con la menor eficiencia la reja de barras de sección circular. La eficiencia de la reja de barras de sección triangular se atribuye principalmente a que cada barra perpendicular a la dirección del flujo está inclinada unos pocos grados aguas abajo sobre su eje de modo que los bordes delanteros forman una serie de desplazamientos que se proyectan hacia el flujo, lo que hace que la barra corte una capa delgada desde la parte inferior de la columna de agua en cada abertura de la ranura. Las rejas de barras de sección circular y semicircular se disponen perpendicularmente sin ninguna inclinación respecto a su eje, por lo que el efecto de corte en estas rejas se considera prácticamente nulo.



Figura 3.1. Gráfico de flujo de agua limpia capturado por las rejas de barras de sección triangular, circular y semicircular

En la figura 3.1 se presenta el porcentaje de agua limpia capturado por cada prototipo de reja en tres ángulos de inclinación del canal (20, 35 y 45 grados). Considerando que el caudal de ingreso al canal es constante para todos los experimentos, la velocidad y el tirante del flujo sobre la reja son modificados indirectamente con la inclinación del canal. Todas las rejas presentan su mayor eficiencia a 35 grados de inclinación. Los experimentos de laboratorio realizados con diferentes inclinaciones muestran que las rejas con barras de sección triangular y circular tienen comportamientos opuestos. Las rejas con barras triangulares son más eficientes en términos de flujo capturado a medida que la inclinación del canal y los números de Reynolds y Froude aumentan, mientras que las rejas de barras circulares son más eficientes a medida que la inclinación del canal y los números de Reynolds y Froude aumentan, mientras que las rejas de barras circulares son más eficientes a medida que la inclinación del canal y los números de Reynolds y Froude aumentan, mientras que las rejas de barras circulares son más eficientes a medida que la inclinación del canal y los números de reynolds y Froude aumentan, mientras que las rejas números de Reynolds y Froude disminuyen, la reja con barras de sección semicircular presenta un rendimiento intermedio.

3.1.2. Experimentos con agua y sedimento

En las pruebas anteriores se determinó que la reja de barras de sección triangular es más eficiente en cuanto a cantidad de agua limpia capturada. En la presente sección se presentan los resultados del rendimiento de las rejas de barras de sección triangular, circular y semi circular bajo condiciones de agua y sedimento. El primer escenario se desarrolló con sedimento separado, se utilizó arena de río clasificada por rangos de tamaños de partículas con una cantidad de 315g para cada uno de los experimentos. Se utilizaron las mismas condiciones de caudal e inclinaciones del canal que los experimentos con agua limpia.

Las muestras de agua y sedimento capturadas por las rejas se recolectaron en un tanque específico, se secaron y pesaron para determinar la cantidad que logró ingresar por las ranuras de la reja. La diferencia respecto al total de sedimento vertido, permite determinar la cantidad de sedimento excluido.

En las pruebas realizadas con sedimento no se presentó obstrucción en las ranuras de las rejas. La posición de la reja en la zona baja del canal generó en todos los casos un flujo supercrítico que produjo autolimpieza. Las rejas con ranuras de 2mm captaron el mismo caudal de agua bajo condiciones de agua limpia como con presencia de sedimento. En las tablas 3.2, 3.3, 3.4 y figuras 3.2, 3.3, 3.4 se presentan los resultados de laboratorio obtenidos en las pruebas de agua y sedimento con rangos de tamaño de partículas por separado para las rejas de barras de sección triangular, circular y semicircular respectivamente.

Tabla 3.2. Resultados de laboratorio con sedimento separado reja con barras de se	ección
triangular	

Angulo del canal (°)	Caudal captado por la reja (L/s)	Tamaño de partículas (mm)	Sedimento captado (gr)	% de sedimento captado	% de sedimento excluido
		>2	0	0.00	100.00
		(2-1)	1	0.32	99.68
20	0.81	(1-0.3)	92	29.21	70.79
		(0.3-0.15)	134	42.54	57.46
		(0.15-0.063)	144	45.71	54.29
		>2	0	0.00	100.00
		(2-1)	1	0.32	99.68
35	1.11	(1-0.3)	76	24.13	75.87
		(0.3-0.15)	151	47.94	52.06
		(0.15-0.063)	134	42.54	57.46
		>2	0	0.00	100.00
		(2-1)	1	0.32	99.68
45	1.1	(1-0.3)	86	27.30	72.70
		(0.3-0.15)	168	53.33	46.67
		(0.15-0.063)	159	50.48	49.52



Figura 3.2. Gráfico de sedimento excluido por la reja de barras de sección triangular

Tabla 3.3. Resultados de laboratorio con sedimento separado reja con barras de sección
circular

Angulo	Caudal	Tamaño de	Sedimento	% de	% de
del	captado	partículas	captado	sedimento	sedimento
canal	por la	(mm)	(gr)	captado	excluido
	reja (L/s)				
	(1,0)	>2	0	0.00	100.00
		(2-1)	0.25	0.08	99.92
20	0.51	(1-0.3)	48	15.24	84.76
		(0.3-0.15)	67	21.27	78.73
		(0.15-0.063)	75	23.81	76.19
		>2	0	0.00	100.00
		(2-1)	0.1	0.03	99.97
35	0.54	(1-0.3)	24	7.62	92.38
		(0.3-0.15)	51	16.19	83.81
		(0.15-0.063)	66	20.95	79.05
		>2	0	0.00	100.00
		(2-1)	0.2	0.06	99.94
45	0.46	(1-0.3)	30	9.52	90.48
		(0.3-0.15)	49	15.56	84.44
		(0.15-0.063)	69	21.90	78.10



Figura 3.3. Gráfico de sedimento excluido por la reja de barras de sección circular

Tabla 3.4. Resultados de laboratorio con sedimento separado reja con barras de sección
semi circular

Angulo del canal	Caudal captado por la reja	Tamaño de partículas (mm)	Sedimento captado (gr)	% de sedimento captado	% de sedimento excluido	
	(Ľ/0)	>2	0	0.00	100.00	
		(2-1)	1	0.32	99.68	
20	0.78	(1-0.3)	77	24.44	75.56	
		(0.3-0.15)	112	35.56	64.44	
		(0.15-0.063)	110	34.92	65.08	
		>2	0	0.00	100.00	
		(2-1)	0.5	0.16	99.84	
35	0.92	(1-0.3)	49	15.56	84.44	
		(0.3-0.15)	98	31.11	68.89	
		(0.15-0.063)	96	30.48	69.52	
		>2	0	0.00	100.00	
		(2-1)	0.6	0.19	99.81	
45	0.83	(1-0.3)	66	20.95	79.05	
		(0.3-0.15)	115	36.51	63.49	
		(0.15-0.063)	135	42.86	57.14	





El porcentaje de sedimento excluido, como se indica en las tablas 3.2, 3.3, 3.4 y figuras 3.2, 3.3, 3.4, representa la fracción de material que no pasó a través de la reja para ese intervalo de tamaño de partícula y es una medida de la efectividad de la reja. A medida que la distribución de sedimentos se vuelve más gruesa, aumenta la tasa de exclusión general. Como se esperaría, una reja con un espacio entre barras específico, por ejemplo, 2mm, debería eliminar todas las partículas con un tamaño mayor o igual que 2mm y los datos respaldan en gran medida esta afirmación. Todas las rejas excluyen el 100% de partículas iguales o mayores al tamaño de la ranura de 2mm. Partículas de menor tamaño de la ranura también son excluidas en porcentajes que van disminuyendo conforme el rango de tamaño de partículas se reduce.

Para el rango de partículas entre 2 y 1mm, las tres rejas excluyen un porcentaje similar superior al 99% en las tres inclinaciones del canal, a partir del rango de partículas entre 1 y 0.3mm se presenta la mayor diferencia en la capacidad de exclusión de sedimento. El porcentaje de exclusión más alto para todos los tamaños de partículas lo presenta la reja de barras de sección circular. Se toman como referencia las partículas de menor diámetro en el rango (0.15 mm – 0.063 mm) con una inclinación de 35°. La reja de barra circular evita la entrada de hasta un 79.05 % en comparación con la reja de barra triangular con un 57.46 %.

El desfase angular de las barras de sección triangular que genera el efecto de corte, se presenta como una ventaja en la captación de agua limpia, sin embargo, en las pruebas con agua y sedimento es una variable desfavorable. El borde actúa como obstáculo y retiene partículas pequeñas de sedimento que son captadas junto con la lámina de agua que ingresa por cada ranura, la mayor cantidad de partículas retenidas está en el rango de 0.3mm hasta 0.063mm.

Por otra parte, la ausencia de esquinas y bordes afilados en la superficie curva de las barras circulares hace que el efecto de corte sea nulo, no hay obstáculos para el paso del agua con sedimento, el flujo se desliza sobre la superficie curva de cada barra sin interferencias, lo que beneficia a la captación de agua con la menor cantidad de sólidos.

En la figura 3.5 se presenta el porcentaje promedio de sedimento excluido para las tres secciones de barra utilizadas en la experimentación física. La reja de barras de sección circular presenta el mejor rendimiento en cuanto a la exclusión de sedimento con un 88.80% a 35 grados de inclinación del canal.



Figura 3.5. Gráfico de porcentaje promedio de sedimento excluido

El porcentaje de exclusión de sedimento presentado en la figura 3.5 no es un indicador que por sí solo represente completamente la eficiencia de la reja. En las pruebas con agua limpia, la reja que capta la mayor cantidad de agua es la triangular. En las pruebas de agua con sedimento, la reja que excluye mayor cantidad de sedimento es la de barras de sección circular. Por lo tanto, la eficiencia debe evaluarse considerando la relación entre el sedimento excluido y el flujo capturado.

3.1.3. Relación sedimento/caudal capturado.

El caudal captado o el porcentaje de sedimento excluido por si solos no representan la eficiencia de la reja [67]. La relación entre el porcentaje de sedimento y el caudal capturado puede representar la eficiencia de la reja de una forma más completa. En las tablas 3.5, 3.6, 3.7 se presentan los resultados de laboratorio de las relaciones de sedimento y caudal de agua capturados, obtenidos con rangos de tamaño de partículas por separado para las rejas de barras de sección triangular, circular y semicircular respectivamente. La figura 3.6 muestra la cantidad específica de sedimento capturado por cada L/s de agua para los tres tipos de barras y ángulos de inclinación de 20°, 35° y 45° .

Angulo del canal (°)	Caudal captado por la reja (L/s)	Tamaño de partículas (mm)	Sedimento captado (gr)	Sedimento captado en (gr/L)	Sedimento captado en (gr/L/s)	Suma de sedimento captado en (gr/L/s)	
		>2	0	0.00	0.00		
		(2-1)	1	0.08	1.23		
20	0.81	(1-0.3)	92	7.30	113.58	458.02	
		(0.3-0.15)	134	10.63	165.43		
		(0.15-0.063)	144	11.43	177.78		
		>2	0	0.00	0.00		
		(2-1)	1	0.08	0.90		
35	1.11	(1-0.3)	76	6.03	68.47	326.13	
		(0.3-0.15)	151	11.98	136.04		
		(0.15-0.063)	134	10.63	120.72		
		>2	0	0.00	0.00		
		(2-1)	1	0.08	0.91		
45	1.1	(1-0.3)	86	6.83	78.18	376.36	
		(0.3-0.15)	168	13.33	152.73]	
		(0.15-0.063)	159	12.62	144.55		

Tabla 3.5. Resultados de laboratorio, relación entre sedimento y caudal de agua capturado por la reja con barras de sección triangular.

Tabla 3.6.	Resultados	de	laboratorio,	relación	entre	sedimento	у	caudal	de	agua
capturado p	oor la reja coi	n ba	arras de secc	ción circul	ar.					-

Angulo del canal	Caudal captado por la reja (L/s)	Tamaño de partículas (mm)	Sedimento captado (gr)	Sedimento captado en (gr/L)	Sedimento captado en (gr/L/s)	Suma de sedimento captado en (gr/L/s)	
		>2	0	0.00	0.00		
		(2-1)	0.25	0.02	0.49		
20	0.51	(1-0.3)	48	3.81	94.12	373.04	
		(0.3-0.15)	67	5.32	131.37		
		(0.15-0.063)	75	5.95	147.06		
		>2	0	0.00	0.00		
]		(2-1)	0.1	0.01	0.19		
35	0.54	(1-0.3)	24	1.90	44.44	261.30	
		(0.3-0.15)	51	4.05	94.44		
		(0.15-0.063)	66	5.24	122.22		
		>2	0	0.00	0.00		
		(2-1)	0.2	0.02	0.43		
45	0.46	(1-0.3)	30	2.38	65.22	322.17	
		(0.3-0.15)	49	3.89	106.52		
		(0.15-0.063)	69	5.48	150.00		

Angulo	Caudal	Tamaño de	Sedimento	Sedimento	Sedimento	Suma de
del	captado	partículas	captado (g)	captado en	captado en	sedimento
canal	por la reja	(mm)		(g/L)	(g/L/s)	captado en
	(L/S)		-			(gi/L/S)
		>2	0	0.00	0.00	
		(2-1)	1	0.08	1.28	
20	0.78	(1-0.3)	77	6.11	98.72	384.62
		(0.3-0.15)	112	8.89	143.59	
		(0.15-0.063)	110	8.73	141.03	
		>2	0	0.00	0.00	
		(2-1)	0.5	0.04	0.54	
35	0.92	(1-0.3)	49	3.89	53.26	264.67
		(0.3-0.15)	98	7.78	106.52	
		(0.15-0.063)	96	7.62	104.35	
		>2	0	0.00	0.00	
		(2-1)	0.6	0.05	0.72	
45	0.83	(1-0.3)	66	5.24	79.52	381.45
		(0.3-0.15)	115	9.13	138.55	
		(0.15-0.063)	135	10.71	162.65	

Tabla 3.7. Resultados de laboratorio, relación entre sedimento y caudal de agua capturado, reja con barras de sección semi circular.



Figura 3.6. Gráfico del porcentaje promedio de sedimento excluido

Los resultados presentados en el gráfico de la figura 3.6 demuestran la eficiencia de las rejas analizadas en cuanto a cantidad de agua captada y exclusión de sedimento. Mientras menor es dicho valor, mayor es la eficiencia de la reja al trabajar con agua y sedimento.

En cuanto a exclusión de sedimento, la reja de barras de sección circular presenta la mayor eficiencia para todos los ángulos de inclinación, seguida de la barra de sección semicircular y con la menor eficiencia la barra de sección triangular. En todos los casos la mayor eficiencia se presenta con un ángulo de inclinación del canal de 35 grados.

Captar agua de mejor calidad representa una reducción en la cantidad de caudal de agua captado, en tal sentido, si se selecciona una reja de barras de sección circular, se requiere un área más grande o varias rejas para lograr la tasa de flujo objetivo. En caudales bajos como es el caso del presente estudio, el área requerida de la reja es pequeña, por lo que aumentar o duplicar el tamaño o usar varias rejas adyacentes, sería una acción razonable y relativamente económica.

3.1.4. Variación de la eficiencia de la reja de barras de sección circular en función del diámetro de barra

Considerando la facilidad constructiva y la eficiencia en exclusión de sedimentos presentada por la reja de barras de sección circular, se evalúa el efecto que tiene el diámetro de las barras, se utilizan dos diámetros adicionales disponibles en la serie de diámetros comerciales (6.3mm y 3mm), uno superior y otro inferior al originalmente evaluado (5mm).

Los resultados de las pruebas de laboratorio para evaluar el efecto del diámetro de la barra de sección circular sobre la exclusión de sedimento, se presentan en las tablas 3.8, 3.9 y 3.10. Se demuestra que con un mayor diámetro se puede incrementar la capacidad de captación de agua, sin embargo, la mayor eficiencia en cuanto a exclusión de sedimento se logra con la barra de 3mm a una inclinación de 45 grados.

La reja con barra de 6.3mm de diámetro genera un ingreso de sedimentos que supera notablemente a la de 5mm en todos sus ángulos de inclinación, aumentando el ingreso de sedimentos hasta en un 90% a los 45°, 46% a los 35° y 117% a los 25°. La reja con barra de 3mm presenta un aumento de eficiencia en comparación con la de 5 mm, disminuyendo el ingreso de sedimento en un 2.3% a los 45° y un 25% a los 35°.

Angulo del canal (°)	Caudal captado (L/s)	Diámetro de partículas (mm)	Sedimento captado (gr)	% de sedimento captado	% de sedimento excluido	Sedimento captado en (gr/L)	Sedimento captado en (gr/L/s)	Suma de sedimento captado en (gr/L/s)	
		>2	0	0.00	100.00	0.00	0.00		
		(2-1)	0.4	0.13	99.87	0.03	0.78		
20	0.51	(1-0.3)	4	1.27	98.73	0.32	7.84	189.02	
		(0.3-0.15)	28	8.89	91.11	2.22	54.90		
		(0.15-0.063)	64	20.32	79.68	5.08	125.49		
		>2	0	0.00	100.00	0.00	0.00		
		(2-1)	0.4	0.13	99.87	0.03	0.74		
35	0.54	(1-0.3)	4	1.27	98.73	0.32	7.41	230.37	
		(0.3-0.15)	40	12.70	87.30	3.17	74.07		
		(0.15-0.063)	80	25.40	74.60	6.35	148.15		
		>2	0	0.00	100.00	0.00	0.00		
		(2-1)	0.4	0.13	99.87	0.03	0.98		
45	45 0.41	(1-0.3)	3.2	1.02	98.98	0.25	7.80	135.61	
		(0.3-0.15)	16	5.08	94.92	1.27	39.02		
		(0.15-0.063)	36	11.43	88.57	2.86	87.80		

Tabla 3.8. Resultados de laboratorio de agua con sedimento con reja de barras de sección circular, diámetro 5mm.

Tabla 3.9.	Resultados	de laboratorio	de	agua	con	sedimento	con	reja	de	barras	de
sección ciro	cular, diámet	tro 6.3mm.		-				-			

Angulo del canal (°)	Caudal captado (L/s)	Diámetro de partículas (mm)	Sedimento captado (gr)	% de sedimento captado	% de sedimento excluido	Sedimento captado en (gr/L)	Sedimento captado en (gr/L/s)	Suma de sedimento captado en (gr/L/s)	
		>2	0	0.00	100.00	0.00	0.00		
		(2-1)	0.8	0.25	99.75	0.06	1.82		
20	0.44	(1-0.3)	12	3.81	96.19	0.95	27.27	410.91	
		(0.3-0.15)	100	31.75	68.25	7.94	227.27		
		(0.15-0.063)	68	21.59	78.41	5.40	154.55		
		>2	0	0.00	100.00	0.00	0.00		
		(2-1)	0.8	0.25	99.75	0.06	1.63		
35	0.49	(1-0.3)	8	2.54	97.46	0.63	16.33	336.33	
		(0.3-0.15)	68	21.59	78.41	5.40	138.78		
		(0.15-0.063)	88	27.94	72.06	6.98	179.59		
		>2	0	0.00	100.00	0.00	0.00		
		(2-1)	0.8	0.25	99.75	0.06	1.60		
45	0.5	(1-0.3)	8	2.54	97.46	0.63	16.00	257.60	
		(0.3-0.15)	60	19.05	80.95	4.76	120.00		
		(0.15-0.063)	60	19.05	80.95	4.76	120.00		

Angulo del canal (°)	Caudal captado (L/s)	Diámetro de partículas (mm)	Sedimento captado (gr)	% de sedimento captado	% de sedimento excluido	Sedimento captado en (gr/L)	Sedimento captado en (gr/L/s)	Suma de sedimento captado en (gr/L/s)	
		>2	0	0.00	100.00	0.00	0.00		
		(2-1)	0.4	0.13	99.87	0.03	0.63		
20	0.63	(1-0.3)	4	1.27	98.73	0.32	6.35	222.86	
		(0.3-0.15)	44	13.97	86.03	3.49	69.84		
		(0.15-0.063)	92	29.21	70.79	7.30	146.03		
		>2	0	0.00	100.00	0.00	0.00		
		(2-1)	0.4	0.13	99.87	0.03	0.74		
35	0.54	(1-0.3)	4	1.27	98.73	0.32	7.41	171.11	
		(0.3-0.15)	32	10.16	89.84	2.54	59.26		
		(0.15-0.063)	56	17.78	82.22	4.44	103.70		
		>2	0	0.00	100.00	0.00	0.00		
		(2-1)	0.4	0.13	99.87	0.03	0.83		
45	45 0.48	(1-0.3)	3.2	1.02	98.98	0.25	6.67	132.50	
		(0.3-0.15)	20	6.35	93.65	1.59	41.67		
		(0.15-0.063)	40	12.70	87.30	3.17	83.33		

Tabla 3.10. Resultados de laboratorio de agua con sedimento con reja de barras de sección circular, diámetro 3mm.



Figura 3.7. Gráfica de sedimento captado por rejas de barras de sección circular de diferentes diámetros, utilizando sedimento mezclado

En la figura 3.7 se presenta una gráfica del total de sedimento capturado por cada litro por segundo de agua versus el diámetro de reja de barras circulares en tres ángulos de inclinación del canal (20, 35 y 45 grados). Los resultados demuestran que la exclusión de sedimento es función del diámetro de la barra y la inclinación del canal. Tomando en cuenta que las rejas de efecto Coanda se ubican generalmente con ángulos de inclinación elevados, en las captaciones de agua superficial con rejas de fondo, se considera la reja de barra circular de 3mm como la óptima o más eficiente de las tres probadas ya que muestra el mejor rendimiento al trabajar con 45° de inclinación.

En base a lo expuesto en el párrafo anterior, el uso de rejas con barras de sección circular transversales al flujo tiene dos consideraciones importantes, si el objeto es captar mayor cantidad de agua sin importar la cantidad de sedimentos, la mejor opción es utilizar diámetros grandes con números de Froude bajos, el segundo escenario y que probablemente es el más común e importante, es aquel en el que se requiere captar agua con la menor cantidad de sedimentos posible, para este caso es conveniente utilizar diámetros pequeños con números de Froude altos.

3.2. EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos mediante el estudio de experimentación numérica desarrollado con el código numérico ANSYS FLUENT. Todos los casos se realizaron con agua limpia, los resultados de las simulaciones se validaron con resultados de laboratorio, posterior a ello se desarrollaron una serie de experimentos numéricos para evaluar la influencia de variables geométricas relevantes del canal y las rejas sobre el caudal captado.

3.2.1. Validación de la simulación

La validación del modelo matemático se realiza en base a lo descrito en la sección 2.2.5.

Los dominios y las mallas del canal y la reja se trabajaron por separado, debido principalmente a la diferencia que existe entre el tamaño de los elementos, mientras el canal tiene dimensiones de metros, la reja y las barras tienen dimensiones de milímetros, en tal sentido la resolución y el refinamiento de las mallas difiere significativamente. El tamaño más pequeño de un elemento en la malla del canal es de 0.3mm mientras que en la reja es de 0.04mm. Los resultados de simulaciones con mallas generales que contienen el canal y la reja no fueros satisfactorios y presentaron costes computacionales elevados. Por tal razón los dominios, mallas y simulaciones se realizaron de forma independiente para el canal y las rejas.

La validación del modelo matemático se inició con la simulación del flujo sobre el canal donde está instalada la reja del prototipo A5, las características completas del canal y la reja se describen en la tabla 2.12.

El canal es prismático y tiene una inclinación de 26.3 grados respecto a la horizontal, el caudal de entrada es de 2.27 L/s. Las condiciones iniciales para la simulación del flujo sobre el canal fueron caudal y tirante crítico sobre la cresta del vertedero.

Los resultados de la simulación del vertedero y el canal del prototipo A5, se presentan en las figuras 3.8, 3.9 y 3.10.

En la figura 3.8 se presenta los contornos de fracción de volumen de las fases agua y aire, a partir de estos resultados se extrajo las condiciones iniciales para la simulación de la reja.



Figura 3.8. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal de la reja prototipo A5, contornos de fracción de volumen fases agua-aire.



Figura 3.9. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal de la reja prototipo A5, contornos de velocidad.

Para confirmar la convergencia a un estado estacionario con soluciones de alta precisión, los criterios utilizados en el presente estudio se basaron en un residuo máximo de RES=10⁻⁶, figura 3.10.



Figura 3.10. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal de la reja prototipo A5, residuales de convergencia.

Test de independencia de mallado

Una vez que se han obtenido resultados satisfactorios en la simulación del flujo sobre el canal, se procede a configurar la simulación de la reja del prototipo A5, esta cuenta con 10 barras de sección triangular y 11 ranuras. La validación de la simulación se realizó en base a la comparación del caudal captado en el experimento de laboratorio versus el caudal captado en la simulación CFD.

Los resultados de las simulaciones del flujo sobre las rejas demostraron alta sensibilidad al tamaño de malla, de tal manera que, para definir el tamaño óptimo de los elementos, se realizó un estudio de independencia de mallado, este consistió en refinar la malla hasta lograr resultados consistentes con los de laboratorio, se inició con tamaños de elemento de 0.2mm y se refinó hasta un tamaño de 0.04mm en las ranuras de las barras.

En la tabla 3.11 se presentan los resultados del test de independencia de mallado, el tamaño de elemento de malla se refina hasta que el error relativo entre el caudal de laboratorio y el caudal simulado con CFD sea inferior al 5%. El error relativo fue determinado por la ecuación 3.1.

$$Error \ relativo(\%) = \frac{|caudal \ de \ laboratorio - caudal \ CFD \ |}{caudal \ de \ laboratorio} x100$$
(3.1)

En la tabla 3.11 en la columna de caudal CFD, se observa que el cambio porcentual entre los caudales simulados para las mallas de 0.05 y 0.04mm es inferior al 2%. De igual manera, el error relativo entre el caudal medido en laboratorio y el simulado mediante CFD, es de 2.67%. Por lo tanto, se considera que el tamaño de malla y las condiciones computacionales establecidas son adecuadas para realizar el estudio paramétrico CFD del presente trabajo.

Tamaño de elemento de malla (mm)	Número de nodos	Caudal de laboratorio (L/s)	Caudal CFD (L/s)	Error relativo (%)	Error relativo caudal de laboratorio vs caudal CFD (%)
0.2	39510	0.487	0.396		18.69
0.1	155721	0.487	0.440	11.11	9.65
0.05	501376	0.487	0.466	5.91	4.31
0.04	671511	0.487	0.474	1.72	2.67

Tabla 3.11. Independencia de malla para prototipo A5

En la figura 3.11 se presentan los resultados de la simulación numérica para la reja del prototipo A5. En la figura 3.11(a) se presenta los contornos de fracción de volumen para las fases agua-aire, se observa que el flujo que se acerca a la primera mitad de la reja no se alinea con la cara de las barras inclinadas (inicialmente está alineado con la pendiente del canal), debido a esto la tasa de flujo a través de las primeras ranuras de las barras es más baja que el flujo a través de las ranuras aguas abajo. Al igual que el experimento realizado en [68], para validar la simulación numérica se utiliza el flujo capturado por las 6 últimas ranuras. En el experimento físico no es posible o resultaría muy complejo medir el caudal que ingresa por cada ranura, este se estima como el promedio entre el caudal total captado y el número de ranuras, con la simulación CFD es posible calcular el caudal individual que ingresa por cada ranura, esto permite determinar la tendencia de los caudales a lo largo de la reja. En las figuras 3.11(b) y 3.11(c) se presentan los resultados de los contornos de presión y los contornos de velocidad respectivamente.



(**c**)

Figura 3.11. Resultados de la simulación numérica de flujo de agua limpia sobre la reja prototipo A5 (a) contornos de fracción de volumen, fases agua-aire: (b) contornos de presión; (d) contornos de velocidad.

3.2.2. Comparación del caudal obtenido con datos experimentales vs simulación numérica

En la presente sección se complementa la validación de la simulación realizada en la sección anterior, se presentan los resultados de la simulación de 4 casos desarrollados en la experimentación física con agua limpia en el dispositivo de laboratorio desarrollado para la presente investigación. Se utilizan los resultados de 2 experimentos con rejas de barras de sección triangular y 2 con rejas de barras de sección circular. Las barras tienen un ancho de 5mm y separación de 2mm, todas las rejas tienen 13 barras y 12 ranuras.

Para la discretización de los dominios de las rejas, se utiliza el tamaño de elemento de malla de 0.04mm determinado como adecuado en el test de independencia de mallado de la sección anterior, el procedimiento para determinar las condiciones iniciales para la simulación del flujo sobre la reja, se realizan de manera similar a lo explicado en el numeral 3.2.1.

En la tabla 3.12 se presentan los resultados de los cuatro casos medidos en el modelo físico y los resultados de los caudales obtenidos por simulación CFD; el error relativo máximo es de 4.31% para la simulación de la reja de barra triangular a 35° de inclinación, mientras que el error relativo mínimo de 0.37% se presenta en la reja de barra de sección circular a 35° de inclinación. El porcentaje de error relativo es inferior al 5%, por lo tanto, se considera que el tamaño de malla y las condiciones computacionales establecidas son adecuadas para realizar el estudio paramétrico CFD del presente trabajo.

Sección	Inclinación	Caudal Caudal		Error rolativo (ocudal do laboratorio
de		laboratorio	CFD	
barra	reja (*)	(L/s)	(L/s)	vs. Caudal CFD) (%)
Triongulor	35	1.11	1.16	4.5
l riangular	45	1.1	1.14	3.64
Circular	20	0.51	0.505	0.98
Circular	35	0.54	0.542	0.37

 Tabla 3.12. Caudal obtenido con datos experimentales vs. Caudal obtenido mediante simulación numérica.

Resultados CFD de rejas de barras de sección triangular

En la figura 3.12(a) se presenta los contornos de fracción de volumen de las fases aguaaire para la reja de barra de sección triangular, la figura 3.12(b) presenta la trayectoria de los vectores de velocidad y los contornos de presión, las barras individuales están inclinadas a lo largo de sus ejes de manera que el borde delantero de cada barra se proyecta hacia el flujo, lo que hace que la reja corte una capa delgada del flujo desde la parte inferior de la columna de agua en cada abertura de la ranura.



(**b**)

Figura 3.12. Resultados de simulación CFD de reja de barra de sección triangular; (a) fracción de contorno de volumen; (b) vectores de velocidad y contornos de presión.

Resultados CFD de rejas de barras de sección circular

7.908e+02 2.540e+02 -2.827e+02 -8.195e+02 -1.356e+03 -1.893e+03

Los contornos de fracción de volumen de las fases agua-aire para la reja de barra de sección circular se muestran en la figura 3.13(a), la figura 3.13(b) presenta la trayectoria de los vectores de velocidad y los contornos de presión.



(**b**)

Figura 3.13. Resultados de simulación CFD de reja de barra circular; (a) fracción de volumen de contorno de dos fases; (b) vectores de contornos de velocidad y presión.

En la reja de barra de sección circular, el flujo se desvía en el punto de estancamiento que se produce después de que la lámina de agua se separa de la barra y salta a la siguiente, chocando con la parte superior de esta. La posición del punto de estancamiento depende de la separación y el diámetro de las barras; esta posición influye en el caudal captado por cada ranura.

3.2.3. Estudio paramétrico CFD 2D

El estudio de experimentación física demostró que el caudal de agua limpia que es captado por una reja de barras transversales al flujo, está en función de las características geométricas de las barras que componen la reja, entre las más relevantes se tienen la forma o sección, ancho de barra, ancho de la ranura, inclinación y la posición de las rejas a lo largo del canal.

Para evaluar la influencia que cada una de estas variables tiene sobre el caudal captado, se ha realizado un estudio paramétrico CFD en 2 dimensiones. El modelado numérico permite realizar los cálculos de variables que son difíciles de medir mediante procedimientos experimentales. En particular, el modelo puede calcular el caudal, la velocidad y la presión en cada ranura de la reja. Es posible estudiar el efecto generado al modificar variables independientes evitando costosas modificaciones del montaje experimental.

Simulación del flujo sobre el vertedero y el canal con ángulos de inclinación de 20, 35 y 45 grados.

Todas las simulaciones se realizan con un caudal constante de 2.5 L/s, para modificar la velocidad y la profundidad del flujo sobre la reja, se utilizan 3 ángulos de inclinación del canal y 3 posiciones de la reja a lo largo del canal.

Se desarrolló la simulación del flujo de agua limpia sobre el vertedero y el canal en las tres inclinaciones utilizadas en laboratorio (20,35 y 45 grados). El flujo sobre el canal es supercrítico. Una vez que los resultados convergieron, se generó superficies perpendiculares en las tres zonas de interés a lo largo del canal (alta, media y baja), de esta manera se interpolaron y extrajeron los resultados de variables como velocidad, presión y fase, que se utilizaron como condiciones iniciales para la simulación del flujo de agua limpia sobre las rejas.

En las figuras 3.14, 3.15 y 3.16, se presentan los resultados de las simulaciones CFD del flujo sobre el vertedero y el canal en los ángulos de 20, 35 y 45 grados respectivamente.





(**b**)

Figura 3.14. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal del dispositivo de laboratorio a 20°; (a) contornos de fracción de volumen, fases aguaaire; (b) contornos de velocidad;



Figura 3.15. Resultados de la simulación numérica del flujo sobre el vertedero y canal del dispositivo de laboratorio a 35°; (a) contornos de fracción de volumen, fases aguaaire; (b) contornos de velocidad;





Estudio paramétrico CFD con rejas de barras de sección triangular

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones realizadas en el estudio paramétrico CFD - 2D con rejas de barras de sección triangular. Los resultados que se presentan en las tablas 3.13 a 3.18 corresponden a las configuraciones de la matriz de casos presentada en la tabla 2.13, desde el caso 1 hasta el caso 54, se presentan los resultados de los caudales capturados por cada ranura, en total son 13 caudales, en las dos últimas columnas de la tabla se presentan el caudal total capturado por la reja (Δ q) y el caudal de salida aguas abajo de la reja.

Cada prototipo de reja de barras de sección triangular fue simulado en las tres zonas del canal (alta, media y baja) en tres ángulos de inclinación (20°, 35° y 45°). Como ejemplo, en las figuras 3.17, 3.18 y 3.19, se presenta los resultados de las simulaciones CFD de la reja de barras de sección triangular de 5mm de diámetro con ranura de 2mm, a 35 grados de inclinación.

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
		L/s														
1	T-1	8.13E-09	2.65E-02	4.38E-02	4.84E-02	5.16E-02	5.35E-02	5.46E-02	5.60E-02	5.71E-02	5.80E-02	5.94E-02	6.20E-02	6.97E-02	6.41E-01	1.86E+00
2	T-1	0.00E+00	1.49E-02	3.06E-02	5.15E-02	5.73E-02	5.98E-02	6.21E-02	6.37E-02	6.39E-02	6.51E-02	6.64E-02	7.14E-02	7.83E-02	6.85E-01	1.82E+00
3	T-1	0.00E+00	1.33E-02	2.72E-02	5.76E-02	6.40E-02	7.26E-02	7.50E-02	7.66E-02	7.80E-02	7.89E-02	8.03E-02	8.46E-02	8.83E-02	7.96E-01	1.70E+00
4	T-1	5.14E-05	1.33E-02	4.20E-02	4.90E-02	5.18E-02	5.44E-02	5.56E-02	5.71E-02	5.83E-02	5.99E-02	6.08E-02	6.28E-02	6.72E-02	6.32E-01	1.87E+00
5	T-1	1.14E-05	1.24E-02	4.55E-02	5.43E-02	5.90E-02	6.20E-02	6.53E-02	6.54E-02	6.65E-02	6.78E-02	6.92E-02	7.36E-02	8.18E-02	7.23E-01	1.78E+00
6	T-1	5.39E-07	9.99E-03	4.36E-02	6.35E-02	7.05E-02	7.83E-02	8.11E-02	8.29E-02	8.43E-02	8.56E-02	8.71E-02	9.14E-02	9.62E-02	8.74E-01	1.63E+00
7	T-1	0.00E+00	3.29E-02	4.11E-02	4.60E-02	4.97E-02	5.16E-02	5.33E-02	5.47E-02	5.59E-02	5.71E-02	5.84E-02	6.07E-02	6.61E-02	6.27E-01	1.87E+00
8	T-1	0.00E+00	1.99E-02	3.02E-02	5.07E-02	5.66E-02	5.98E-02	6.25E-02	6.37E-02	6.54E-02	6.68E-02	6.83E-02	7.68E-02	7.94E-02	7.00E-01	1.80E+00
9	T-1	0.00E+00	2.66E-02	6.25E-02	6.03E-02	7.08E-02	7.81E-02	8.10E-02	8.33E-02	8.52E-02	8.69E-02	8.85E-02	9.12E-02	9.78E-02	9.12E-01	1.59E+00

Tabla 3.13. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección triangular, ancho 3mm, separación 1mm

Tabla 3.14. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección triangular, ancho 5mm, separación 1mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
			L/s													
10	T-2	7.06E-05	4.32E-02	5.90E-02	6.84E-02	7.13E-02	6.85E-02	7.00E-02	7.61E-02	7.29E-02	7.87E-02	7.56E-02	8.10E-02	8.23E-02	8.47E-01	1.65E+00
11	T-2	0.00E+00	4.38E-02	7.60E-02	8.02E-02	8.35E-02	8.19E-02	8.44E-02	8.89E-02	9.03E-02	9.18E-02	8.91E-02	9.43E-02	9.67E-02	1.00E+00	1.50E+00
12	T-2	0.00E+00	1.99E-02	8.51E-02	9.35E-02	9.78E-02	1.00E-01	1.03E-01	1.04E-01	1.06E-01	1.07E-01	1.08E-01	1.09E-01	1.11E-01	1.14E+00	1.36E+00
13	T-2	1.31E-04	3.17E-02	6.44E-02	6.95E-02	7.21E-02	7.40E-02	7.51E-02	7.63E-02	7.72E-02	7.78E-02	7.86E-02	8.01E-02	8.47E-02	8.62E-01	1.64E+00
14	T-2	0.00E+00	3.28E-02	7.27E-02	8.01E-02	8.43E-02	8.73E-02	8.95E-02	9.14E-02	9.30E-02	9.46E-02	9.60E-02	9.76E-02	1.03E-01	1.02E+00	1.48E+00
15	T-2	1.31E-04	4.52E-03	8.72E-02	9.75E-02	1.03E-01	1.07E-01	1.09E-01	1.11E-01	1.13E-01	1.15E-01	1.16E-01	1.17E-01	1.22E-01	1.20E+00	1.30E+00
16	T-2	1.70E-05	2.99E-02	6.52E-02	7.05E-02	6.93E-02	7.07E-02	7.21E-02	7.93E-02	8.03E-02	8.12E-02	7.89E-02	8.06E-02	8.36E-02	8.62E-01	1.64E+00
17	T-2	0.00E+00	2.43E-02	7.59E-02	8.24E-02	8.68E-02	8.99E-02	9.23E-02	9.41E-02	9.60E-02	9.76E-02	9.94E-02	1.02E-01	1.03E-01	1.04E+00	1.46E+00
18	T-2	0.00E+00	3.31E-04	8.17E-02	1.00E-01	1.06E-01	1.10E-01	1.13E-01	1.15E-01	1.17E-01	1.19E-01	1.21E-01	1.23E-01	1.24E-01	1.23E+00	1.27E+00
CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
-----------	------	-----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------
									L/s							
19	T-3	2.89E-06	5.89E-02	6.85E-02	7.30E-02	7.94E-02	8.19E-02	8.39E-02	8.10E-02	8.68E-02	8.83E-02	8.54E-02	8.65E-02	1.10E-01	9.84E-01	1.52E+00
20	T-3	0.00E+00	6.67E-02	8.33E-02	9.03E-02	9.43E-02	9.69E-02	9.92E-02	1.00E-01	1.03E-01	1.04E-01	1.04E-01	1.06E-01	1.31E-01	1.18E+00	1.32E+00
21	T-3	0.00E+00	9.67E-02	1.02E-01	1.05E-01	1.09E-01	1.12E-01	1.15E-01	1.15E-01	1.18E-01	1.20E-01	1.20E-01	1.20E-01	1.52E-01	1.38E+00	1.12E+00
22	T-3	0.00E+00	5.91E-02	7.62E-02	7.84E-02	8.15E-02	8.40E-02	8.59E-02	8.78E-02	8.82E-02	8.92E-02	8.96E-02	9.03E-02	1.15E-01	1.03E+00	1.47E+00
23	T-3	0.00E+00	6.20E-02	8.62E-02	9.41E-02	9.61E-02	9.82E-02	1.01E-01	1.04E-01	1.06E-01	1.08E-01	1.09E-01	1.11E-01	1.39E-01	1.21E+00	1.29E+00
24	T-3	0.00E+00	3.54E-02	1.03E-01	1.18E-01	1.22E-01	1.25E-01	1.27E-01	1.30E-01	1.32E-01	1.34E-01	1.35E-01	1.37E-01	1.70E-01	1.47E+00	1.03E+00
25	T-3	4.38E-05	5.86E-02	7.13E-02	7.98E-02	8.32E-02	8.58E-02	8.74E-02	8.88E-02	9.00E-02	9.08E-02	9.20E-02	8.97E-02	1.12E-01	1.03E+00	1.47E+00
26	T-3	0.00E+00	3.69E-02	8.60E-02	9.63E-02	1.01E-01	1.04E-01	1.07E-01	1.10E-01	1.12E-01	1.14E-01	1.13E-01	1.13E-01	1.44E-01	1.24E+00	1.26E+00
27	T-3	0.00E+00	9.80E-02	8.75E-02	1.19E-01	1.24E-01	1.29E-01	1.33E-01	1.36E-01	1.39E-01	1.41E-01	1.42E-01	1.42E-01	1.75E-01	1.57E+00	9.35E-01

Tabla 3.15. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección triangular, ancho 6.3mm, separación 1mm

Tabla 3.16. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barra de sección triangular, ancho 3mm, separación 2mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
28	T-4	7.44E-04	3.77E-02	5.91E-02	6.72E-02	7.03E-02	7.31E-02	7.79E-02	7.97E-02	8.06E-02	8.29E-02	8.44E-02	8.81E-02	9.95E-02	9.01E-01	1.60E+00
29	T-4	2.42E-04	2.16E-02	5.76E-02	6.99E-02	7.84E-02	8.76E-02	9.12E-02	9.36E-02	9.53E-02	9.67E-02	9.83E-02	1.02E-01	1.14E-01	1.01E+00	1.49E+00
30	T-4	2.58E-04	1.24E-02	4.89E-02	8.23E-02	9.26E-02	9.89E-02	1.02E-01	1.05E-01	1.07E-01	1.08E-01	1.10E-01	1.12E-01	1.24E-01	1.10E+00	1.40E+00
31	T-4	6.64E-04	3.83E-02	6.07E-02	7.40E-02	7.90E-02	8.23E-02	8.49E-02	8.66E-02	8.77E-02	8.86E-02	9.01E-02	9.30E-02	1.02E-01	9.68E-01	1.53E+00
32	T-4	8.24E-06	1.87E-02	5.51E-02	7.54E-02	8.39E-02	8.91E-02	9.26E-02	9.49E-02	9.66E-02	9.81E-02	1.00E-01	1.04E-01	1.17E-01	1.02E+00	1.48E+00
33	T-4	4.32E-05	1.20E-01	1.22E-01	1.25E-01	1.39E-01	4.44E-03	5.15E-02	8.49E-02	9.98E-02	1.08E-01	1.13E-01	1.16E-01	1.18E-01	1.20E+00	1.30E+00
34	T-4	8.47E-04	3.32E-02	5.63E-02	6.62E-02	7.18E-02	7.67E-02	7.92E-02	8.16E-02	8.22E-02	8.28E-02	8.60E-02	8.75E-02	1.04E-01	9.08E-01	1.59E+00
35	T-4	1.41E-04	2.79E-02	5.52E-02	6.91E-02	7.79E-02	8.91E-02	9.39E-02	9.78E-02	9.48E-02	9.55E-02	1.02E-01	1.08E-01	1.20E-01	1.03E+00	1.47E+00
36	T-4	2.53E-05	1.29E-03	5.25E-02	8.25E-02	9.63E-02	1.05E-01	1.11E-01	1.14E-01	1.17E-01	1.20E-01	1.21E-01	1.25E-01	1.37E-01	1.18E+00	1.32E+00

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
37	T-5	1.69E-03	6.37E-02	8.48E-02	9.31E-02	9.64E-02	9.61E-02	1.02E-01	1.04E-01	1.05E-01	1.11E-01	1.12E-01	1.15E-01	1.13E-01	1.20E+00	1.30E+00
38	T-5	5.76E-05	5.49E-02	9.24E-02	1.11E-01	1.16E-01	1.16E-01	1.21E-01	1.23E-01	1.24E-01	1.26E-01	1.27E-01	1.29E-01	1.37E-01	1.38E+00	1.12E+00
39	T-5	9.24E-06	3.31E-02	1.03E-01	1.26E-01	1.33E-01	1.37E-01	1.39E-01	1.41E-01	1.43E-01	1.44E-01	1.45E-01	1.47E-01	1.51E-01	1.54E+00	9.58E-01
40	T-5	1.30E-03	6.57E-02	8.40E-02	9.36E-02	9.64E-02	1.00E-01	1.07E-01	1.06E-01	1.08E-01	1.09E-01	1.05E-01	1.03E-01	1.17E-01	1.20E+00	1.30E+00
41	T-5	1.46E-05	2.48E-02	9.49E-02	1.09E-01	1.16E-01	1.21E-01	1.23E-01	1.26E-01	1.28E-01	1.30E-01	1.31E-01	1.35E-01	1.41E-01	1.38E+00	1.12E+00
42	T-5	4.01E-05	4.77E-02	9.94E-02	1.31E-01	1.39E-01	1.45E-01	1.49E-01	1.52E-01	1.54E-01	1.55E-01	1.55E-01	1.59E-01	1.62E-01	1.65E+00	8.52E-01
43	T-5	1.48E-04	5.06E-02	8.45E-02	9.41E-02	9.96E-02	1.02E-01	1.11E-01	1.13E-01	1.03E-01	1.03E-01	1.06E-01	1.16E-01	1.21E-01	1.20E+00	1.30E+00
44	T-5	1.66E-04	1.40E-02	8.87E-02	1.12E-01	1.20E-01	1.25E-01	1.29E-01	1.32E-01	1.37E-01	1.39E-01	1.42E-01	1.41E-01	1.46E-01	1.43E+00	1.07E+00
45	T-5	1.09E-05	6.24E-02	1.28E-01	1.39E-01	1.46E-01	1.51E-01	1.55E-01	1.58E-01	1.63E-01	1.66E-01	1.68E-01	1.67E-01	1.68E-01	1.77E+00	7.28E-01

Tabla 3.17. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barra de sección triangular, ancho 5mm, separación 2mm

Tabla 3.18. Resultados de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección triangular, ancho 6.3mm, separación 2mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
46	T-6	4.69E-04	7.68E-02	1.03E-01	1.10E-01	1.14E-01	1.17E-01	1.19E-01	1.21E-01	1.22E-01	1.23E-01	1.23E-01	1.25E-01	1.27E-01	1.38E+00	1.12E+00
47	T-6	1.32E-05	9.34E-02	1.20E-01	1.27E-01	1.31E-01	1.34E-01	1.37E-01	1.39E-01	1.42E-01	1.44E-01	1.45E-01	1.48E-01	1.49E-01	1.61E+00	8.90E-01
48	T-6	1.57E-08	1.09E-01	1.17E-01	1.43E-01	1.50E-01	1.55E-01	1.58E-01	1.60E-01	1.65E-01	1.73E-01	1.78E-01	1.79E-01	1.70E-01	1.86E+00	6.43E-01
49	T-6	1.05E-03	8.09E-02	1.05E-01	1.12E-01	1.16E-01	1.19E-01	1.15E-01	1.21E-01	1.22E-01	1.23E-01	1.23E-01	1.26E-01	1.28E-01	1.39E+00	1.11E+00
50	T-6	1.66E-05	4.33E-02	1.18E-01	1.30E-01	1.37E-01	1.40E-01	1.46E-01	1.47E-01	1.50E-01	1.53E-01	1.54E-01	1.58E-01	1.57E-01	1.63E+00	8.66E-01
51	T-6	3.53E-06	3.07E-02	1.40E-01	1.56E-01	1.65E-01	1.69E-01	1.76E-01	1.77E-01	1.79E-01	1.82E-01	1.83E-01	1.86E-01	1.80E-01	1.92E+00	5.77E-01
52	T-6	3.17E-05	7.42E-02	1.06E-01	1.14E-01	1.19E-01	1.21E-01	1.23E-01	1.24E-01	1.25E-01	1.26E-01	1.27E-01	1.28E-01	1.32E-01	1.42E+00	1.08E+00
53	T-6	1.64E-06	1.88E-02	1.13E-01	1.34E-01	1.41E-01	1.46E-01	1.50E-01	1.53E-01	1.56E-01	1.58E-01	1.60E-01	1.61E-01	1.62E-01	1.65E+00	8.47E-01
54	T-6	4.64E-06	9.08E-04	1.40E-01	1.58E-01	1.68E-01	1.74E-01	1.78E-01	1.82E-01	1.86E-01	1.90E-01	1.97E-01	2.02E-01	1.96E-01	1.97E+00	5.29E-01



Figura 3.17. Resultados CFD reja de barras de sección triangular, ancho 5mm; separación 2mm; zona alta; (a) contornos de fracción de volumen de las fases aguaaire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión.



Figura 3.18. Resultados CFD reja de barras de sección triangular, ancho 5mm; separación 2mm; zona media; (a) contornos de fracción de volumen de las fases aguaaire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión.



Figura 3.19. Resultados CFD reja de barras de sección triangular, ancho 5mm; separación 2mm; zona baja; (a) contornos de fracción de volumen de las fases aguaaire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión. En los contornos de fracción de volumen de las fases agua-aire de las figuras 3.17(a), 3.18(a) y 3.19(a), se puede observar como la profundidad del agua sobre la reja disminuye conforme la ubicación de la reja desciende en el canal, precisamente este fue el objeto de modificar la posición de las rejas. Otra variable que genera un efecto similar es la inclinación del canal. Los contornos de velocidad mostrados en las figuras 3.17(b), 3.18(b) y 3.19(b), demuestran una tendencia incremental de la velocidad conforme la posición de la reja desciende, la velocidad máxima se alcanza en la zona baja del canal. Los contornos de presión mostrados en las figuras 3.17(c), 3.18(c) y 3.19(c), demuestran una tendencia la presión conforme la posición de la reja desciende, la velocidad máxima se alcanza en la zona baja del canal. Los contornos de presión mostrados en las figuras 3.17(c), 3.18(c) y 3.19(c), demuestran una tendencia incremental de la presión de la reja desciende, la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente de la presión conforme la posición de la reja desciente desciente de la presión conforme de la presión de la reja desciente de la presión conforme de la presión de la reja desciente de la presión conforme de la presión de la reja desciente de la presión de la conta de la reja desciente de

Tendencia de caudales captados en las ranuras de rejas de barras de sección triangular

Los resultados de las simulaciones CFD permiten determinar los caudales captados por cada ranura de la reja, con esto es posible evaluar la tendencia de los caudales conforme el flujo avanza sobre cada barra y cada ranura. En las figuras 3.20, 3.21 y 3.22 se presentan las gráficas de los caudales individuales capturados por 8 ranuras de la reja de barras de sección triangular de 5mm de diámetro, separación de 2mm, con inclinaciones de 20, 35 y 45 grados respectivamente.

En la figura 3.20 se presenta una gráfica con la tendencia de los caudales captados por 8 ranuras de la reja de barras de sección triangular, desde la ranura 5 hasta la 12, se descartan las 4 primeras aberturas y la última debido a que en algunos casos se presentan valores que distorsionan la tendencia, esto se aplica para todos los demás casos del estudio paramétrico.



Figura 3.20. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección triangular, θ = 20°; ancho de barra 5mm; separación 2mm.



Figura 3.21. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección triangular, θ = 35°; w=5mm; s=2mm.



Figura 3.22. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección triangular, θ = 45°; w=5mm; s=2mm.

En las figuras 3.20, 3.21 y 3.22, se observa que el caudal captado por cada ranura de la reja de barras de sección triangular es diferente. El caudal captado por cada ranura presenta una tendencia creciente conforme el flujo avanza sobre las barras. La primera ranura capta menor caudal y aumenta progresivamente para las siguientes ranuras. La tendencia creciente se mantiene tanto para la posición, como para la inclinación de la reja. La mayor eficiencia se presenta en la zona baja del canal lo que demuestra que la capacidad de captación es aproximadamente proporcional a la velocidad del fluido. La proporcionalidad respecto al tirante tiene un comportamiento contrario.

En las rejas de barras de sección triangular, la eficiencia de la reja viene determinada por la relación entre el caudal total captado (Δ q) y el caudal total suministrado por el canal (Q1). Se exploró la influencia de los números de Froude y Reynolds sobre Δ q/Q1.

El número de Froude se calculó con el ajuste de pendiente presentado en [25]

$$F = \frac{V}{\sqrt{gDcos\theta}}$$

Donde

F= número de Froude

V = velocidad media a través de la reja;

D = profundidad de flujo;

- θ = ángulo de inclinación de la superficie de la reja, medido desde la horizontal;
- g = aceleración de la gravedad;

Los números de Reynolds se calcularon utilizando como velocidad de referencia, la velocidad de flujo promedio a través de la reja y el ancho de la ranura como la longitud de referencia, esta longitud presentó las mejores correlaciones.

$$R = \frac{Vs}{v}$$

Donde

R = número de Reynolds;

V = velocidad media a través de la reja;

s = ancho de ranura entre barras;

v = viscosidad cinemática;

En las tablas 3.19 a 3.24 se presentan los resultados CFD de las velocidades a la entrada y a la salida de las rejas de barras triangulares, V1 y V2 respectivamente. De igual forma se presentan los tirantes correspondientes, Y1 y Y2. A partir de estos resultados se obtienen las velocidades y tirantes promedio que permiten calcular los números de Froude y Reynolds para cada caso simulado. En la columna final de cada tabla se presenta la relación de caudal captado por la reja sobre el caudal total suministrado ($\Delta q/Q1$).

CASO #	REJA	θ	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
1	T-1	20	alta	1.82	2.05	1.48E-02	9.77E-03	5.75	1924.78	0.256
2	T-1	20	media	2.51	2.73	1.07E-02	7.14E-03	9.15	2611.43	0.274
3	T-1	20	baja	3.08	3.27	8.72E-03	5.60E-03	12.36	3161.48	0.319
4	T-1	35	alta	1.82	2.11	1.48E-02	9.51E-03	6.29	1955.15	0.253
5	T-1	35	media	2.58	2.85	1.04E-02	6.70E-03	10.35	2702.86	0.289
6	T-1	35	baja	3.31	3.57	8.12E-03	4.90E-03	15.04	3423.09	0.350
7	T-1	45	alta	1.82	2.16	1.47E-02	9.33E-03	6.89	1981.31	0.251
8	T-1	45	media	2.60	2.90	1.03E-02	6.67E-03	11.32	2737.08	0.280
9	T-1	45	baja	3.38	3.67	7.94E-03	4.65E-03	16.87	3509.32	0.365

Tabla 3.19. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho de barra 3mm, separación entre barras 1mm

Tabla 3.20. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho de barra 5mm, separación entre barras 1mm

CASO #	REJA	θ	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
10	T-2	20	alta	1.82	2.09	1.48E-02	8.50E-03	5.98	1947.16	0.339
11	T-2	20	media	2.51	2.78	1.07E-02	5.79E-03	9.61	2636.70	0.400
12	T-2	20	baja	3.08	3.30	8.72E-03	4.42E-03	12.96	3174.21	0.458
13	T-2	35	alta	1.82	2.18	1.48E-02	8.09E-03	6.59	1988.11	0.345
14	T-2	35	media	2.58	2.91	1.04E-02	5.46E-03	10.86	2731.21	0.409
15	T-2	35	baja	3.31	3.60	8.12E-03	3.87E-03	15.75	3440.57	0.481
16	T-2	45	alta	1.82	2.24	1.47E-02	7.88E-03	7.25	2020.20	0.345
17	T-2	45	media	2.60	2.96	1.03E-02	5.29E-03	11.95	2768.47	0.417
18	T-2	45	baja	3.39	3.73	7.94E-03	3.66E-03	17.73	3539.53	0.492

CASO #	REJA	θ	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
19	T-3	20	alta	1.82	2.12	1.48E-02	7.70E-03	6.12	1959.92	0.393
20	T-3	20	media	2.51	2.81	1.07E-02	5.06E-03	9.88	2648.71	0.471
21	T-3	20	baja	3.08	3.30	8.72E-03	3.64E-03	13.38	3176.53	0.554
22	T-3	35	alta	1.82	2.22	1.48E-02	7.15E-03	6.80	2008.12	0.410
23	T-3	35	media	2.58	2.94	1.04E-02	4.70E-03	11.20	2746.48	0.486
24	T-3	35	baja	3.31	3.61	8.12E-03	3.07E-03	16.32	3443.83	0.587
25	T-3	45	alta	1.82	2.28	1.47E-02	6.92E-03	7.49	2043.95	0.412
26	T-3	45	media	2.60	2.99	1.03E-02	4.54E-03	12.31	2782.73	0.495
27	T-3	45	baja	3.38	3.76	7.94E-03	2.67E-03	18.62	3555.41	0.626

Tabla 3.21. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho de barra 6.3mm, separación entre barras 1mm

Tabla 3.22. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho de barra 3mm, separación entre barras 2mm

CASO #	REJA	θ	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
28	T-4	20	alta	1.82	2.07	1.48E-02	8.29E-03	5.98	3878.31	0.361
29	T-4	20	media	2.51	2.78	1.07E-02	5.78E-03	9.60	5265.33	0.403
30	T-4	20	baja	3.08	3.29	8.72E-03	4.56E-03	12.88	6344.41	0.442
31	T-4	35	alta	1.82	2.15	1.48E-02	7.66E-03	6.61	3950.01	0.387
32	T-4	35	media	2.58	2.89	1.04E-02	5.49E-03	10.82	5443.74	0.410
33	T-4	35	baja	3.29	3.58	8.18E-03	3.90E-03	15.59	6833.60	0.481
34	T-4	45	alta	1.82	2.20	1.47E-02	7.77E-03	7.21	4007.51	0.363
35	T-4	45	media	2.60	2.94	1.03E-02	5.37E-03	11.87	5514.74	0.412
36	T-4	45	baja	3.39	3.71	7.94E-03	3.82E-03	17.58	7064.57	0.473

CASO #	REJA	θ	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
37	T-5	20	alta	1.82	2.11	1.48E-02	6.62E-03	6.27	3918.25	0.479
38	T-5	20	media	2.51	2.82	1.07E-02	4.28E-03	10.15	5308.85	0.551
39	T-5	20	baja	3.08	3.30	8.72E-03	3.13E-03	13.65	6347.79	0.617
40	T-5	35	alta	1.82	2.21	1.48E-02	6.33E-03	6.92	4011.61	0.478
41	T-5	35	media	2.58	2.93	1.04E-02	4.11E-03	11.40	5481.65	0.552
42	T-5	35	baja	3.31	3.60	8.12E-03	2.55E-03	16.69	6877.52	0.659
43	T-5	45	alta	1.82	2.28	1.47E-02	6.12E-03	7.62	4080.35	0.482
44	T-5	45	media	2.60	2.98	1.03E-02	3.88E-03	12.57	5553.12	0.570
45	T-5	45	baja	3.39	3.71	7.94E-03	2.11E-03	19.01	7064.83	0.709

Tabla 3.23. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho de barra 5mm, separación entre barras 2mm

Tabla 3.24. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección triangular, ancho de barra 6.3mm, separación entre barras 2mm

CASO #	REJA	θ	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
46	T-6	20	alta	1.82	2.14	1.48E-02	5.63E-03	6.46	3940.44	0.553
47	T-6	20	media	2.51	2.83	1.07E-02	3.38E-03	10.49	5318.22	0.644
48	T-6	20	baja	3.08	3.26	8.72E-03	2.12E-03	14.17	6307.39	0.743
49	T-6	35	alta	1.82	2.25	1.48E-02	5.30E-03	7.16	4046.49	0.557
50	T-6	35	media	2.58	2.93	1.04E-02	3.17E-03	11.80	5487.01	0.654
51	T-6	35	baja	3.29	3.53	8.18E-03	1.76E-03	17.07	6787.93	0.769
52	T-6	45	alta	1.82	2.32	1.47E-02	5.01E-03	7.91	4122.55	0.567
53	T-6	45	media	2.60	2.99	1.03E-02	3.05E-03	12.97	5563.12	0.661
54	T-6	45	baja	3.39	3.65	7.94E-03	1.56E-03	19.39	7004.17	0.788

En base a los resultados de las tablas 3.19 a 3.24, se generan las gráficas de las figuras 3.23 y 3.24. Se presentan las relaciones entre $\Delta q/Q1$ versus los números de Froude y de Reynolds, respectivamente. Se evidencia una relación aproximadamente proporcional con cada parámetro adimensional; el flujo capturado por la reja de barras de sección triangular aumenta a medida que aumentan los valores de los números de Froude y Reynolds. Los valores más altos corresponden a la pendiente de 45 grados y ubicación de la reja en la zona baja del canal. El ancho de la barra presenta también una relación aproximadamente proporcional con el caudal captado, manteniéndose la tendencia en cuanto a los números de Froude y Reynolds. La reja que mejor rendimiento

presenta es la de barras de 6.3mm de ancho con 2mm de separación, su máxima capacidad se da en la zona baja del canal con inclinación de 45 grados. El rendimiento de todas las rejas es mayormente influenciado por la posición lo largo del canal, en todos los casos la mayor eficiencia se presenta en la zona baja y la menor en la zona alta. La inclinación del canal influye en menor grado. La combinación de estas dos variables mejora la capacidad de captación de la reja.



Figura 3.23. Relaciones entre $\Delta q/Q1$ y número de Froude para rejas de barras de sección triangular



Figura 3.24. Relaciones entre $\Delta q/q1$ y número de Reynolds para rejas de barras de sección triangular

En la figura 3.24 se presentan los rendimientos de las rejas en función del número de Reynolds. Se observan dos grupos de resultados claramente diferenciados, el primer grupo con número de Reynolds menores a 4000 corresponde a las rejas con ranura de 1mm y el segundo grupo con números de Reynolds mayores a 4000 corresponde a las rejas con ranura de 2mm. Esto se debe a que la longitud característica que se utilizó para el cálculo del número de Reynolds es la separación entre barras.

En general, el comportamiento de las rejas en función del número de Reynolds es similar al comportamiento registrado en función del número de Froude.

- Estudio paramétrico CFD con rejas de barras de sección circular

En la presente sección se muestran los resultados de las simulaciones realizadas en el estudio paramétrico CFD - 2D con rejas de barras de sección circular. Los resultados que se presentan en las tablas 3.25 a 3.40 corresponden a las configuraciones de la matriz de casos presentada en la tabla 2.13, desde el caso 55 hasta el caso 160. Se presentan los resultados de los caudales capturados por cada una de las 13 ranuras de los prototipos evaluados. En las dos últimas columnas de la tabla se presentan el caudal total capturado por la reja (Δ q) y el caudal de salida aguas debajo de esta. Para las rejas de barras de sección circular, la experimentación numérica se realiza bajo las mismas condiciones geométricas y de flujo de las rejas de barras de sección triangular. Los diámetros de barra utilizados son equivalentes a los anchos de las barras de sección triangular (3 mm, 5 mm y 6,3 mm). Adicionalmente, con el fin de evaluar la influencia del diámetro de la barra sobre el caudal captado, se estudian diámetros de barras mayores disponibles comercialmente (10mm, 12mm, 14mm, 16mm y 20mm).

Cada prototipo de reja de barras de sección circular fue simulado en las tres zonas del canal (alta, media y baja) en tres ángulos de inclinación (20°, 35° y 45°). En las figuras 3.25, 3.26 y 3.27, se presenta los resultados de las simulaciones CFD de la reja de barras de sección circular de 5mm de diámetro con ranura de 2mm, a 35 grados de inclinación.

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
55	C-1	2.66E-05	2.23E-02	3.80E-02	4.18E-02	4.20E-02	5.36E-02	4.50E-02	4.42E-02	4.49E-02	4.30E-02	4.46E-02	4.65E-02	7.32E-02	5.39E-01	1.96E+00
56	C-1	1.64E-06	1.70E-02	2.96E-02	3.15E-02	3.23E-02	3.31E-02	3.47E-02	3.28E-02	3.24E-02	3.17E-02	3.20E-02	3.44E-02	6.08E-02	4.02E-01	2.10E+00
57	C-1	5.50E-06	1.25E-02	2.60E-02	2.51E-02	2.61E-02	2.67E-02	2.70E-02	2.59E-02	2.64E-02	2.62E-02	2.60E-02	2.76E-02	5.37E-02	3.29E-01	2.17E+00
58	C-1	8.53E-04	8.52E-03	2.84E-02	4.98E-02	3.73E-02	4.01E-02	4.19E-02	3.85E-02	3.96E-02	4.42E-02	3.94E-02	4.08E-02	6.70E-02	4.77E-01	2.02E+00
59	C-1	1.35E-05	1.23E-02	2.43E-02	2.87E-02	2.78E-02	2.93E-02	3.19E-02	3.16E-02	2.78E-02	4.13E-02	2.78E-02	3.22E-02	5.69E-02	3.72E-01	2.13E+00
60	C-1	5.43E-05	6.64E-03	2.64E-02	2.51E-02	2.60E-02	2.64E-02	2.62E-02	2.52E-02	2.83E-02	2.63E-02	2.51E-02	2.69E-02	5.65E-02	3.25E-01	2.17E+00
61	C-1	4.45E-09	3.87E-02	2.10E-02	3.34E-02	4.41E-02	3.60E-02	3.52E-02	4.42E-02	4.31E-02	3.42E-02	4.34E-02	4.37E-02	6.12E-02	4.78E-01	2.02E+00
62	C-1	1.01E-05	1.44E-02	2.42E-02	2.76E-02	2.77E-02	2.84E-02	2.82E-02	3.67E-02	2.67E-02	2.82E-02	3.56E-02	2.87E-02	5.36E-02	3.60E-01	2.14E+00
63	C-1	0.00E+00	2.18E-03	2.18E-02	2.28E-02	2.41E-02	2.47E-02	2.50E-02	2.52E-02	2.62E-02	2.54E-02	2.53E-02	2.68E-02	5.39E-02	3.03E-01	2.20E+00

Tabla 3.25. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 3mm, separación 1mm

Tabla 3.26. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 5mm, separación 1mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
64	C-2	1.36E-05	4.86E-02	5.51E-02	6.32E-02	5.84E-02	5.97E-02	6.34E-02	5.50E-02	5.29E-02	4.76E-02	4.68E-02	4.48E-02	7.70E-02	6.72E-01	1.83E+00
65	C-2	1.92E-04	2.46E-02	4.22E-02	4.57E-02	4.58E-02	4.67E-02	4.24E-02	3.94E-02	3.92E-02	3.81E-02	3.56E-02	3.71E-02	6.78E-02	5.05E-01	1.99E+00
66	C-2	1.94E-06	2.11E-02	3.56E-02	3.56E-02	3.44E-02	3.38E-02	3.26E-02	3.16E-02	3.07E-02	3.01E-02	2.94E-02	3.11E-02	5.83E-02	4.04E-01	2.10E+00
67	C-2	2.22E-05	5.76E-02	5.44E-02	5.50E-02	5.61E-02	5.39E-02	5.30E-02	5.45E-02	4.79E-02	5.88E-02	4.50E-02	4.84E-02	8.18E-02	6.66E-01	1.83E+00
68	C-2	5.24E-05	2.07E-02	3.98E-02	4.64E-02	4.87E-02	4.73E-02	4.93E-02	5.05E-02	4.87E-02	4.58E-02	4.66E-02	4.67E-02	8.70E-02	5.77E-01	1.92E+00
69	C-2	0.00E+00	1.15E-02	4.15E-02	4.49E-02	4.70E-02	4.75E-02	4.40E-02	4.47E-02	4.50E-02	4.50E-02	4.45E-02	4.65E-02	9.29E-02	5.55E-01	1.95E+00
70	C-2	3.28E-09	4.32E-02	5.54E-02	5.12E-02	4.67E-02	4.33E-02	4.27E-02	3.78E-02	3.63E-02	3.65E-02	3.60E-02	3.77E-02	6.60E-02	5.33E-01	1.97E+00
71	C-2	9.17E-05	2.77E-02	3.82E-02	4.78E-02	3.71E-02	3.47E-02	3.48E-02	3.98E-02	3.18E-02	3.19E-02	2.91E-02	3.17E-02	5.85E-02	4.43E-01	2.06E+00
72	C-2	2.46E-05	1.81E-02	3.66E-02	3.52E-02	3.33E-02	3.20E-02	3.05E-02	3.07E-02	2.99E-02	2.93E-02	3.01E-02	3.21E-02	6.20E-02	4.00E-01	2.10E+00

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
73	C-3	1.72E-04	5.19E-02	6.67E-02	7.05E-02	7.06E-02	6.94E-02	7.18E-02	5.91E-02	6.30E-02	5.23E-02	4.67E-02	4.90E-02	7.62E-02	7.47E-01	1.75E+00
74	C-3	1.91E-04	3.25E-02	5.51E-02	5.40E-02	4.99E-02	4.99E-02	4.76E-02	4.69E-02	4.31E-02	4.32E-02	4.13E-02	3.90E-02	7.45E-02	5.77E-01	1.92E+00
75	C-3	9.96E-06	4.62E-02	4.72E-02	4.35E-02	3.71E-02	3.82E-02	3.33E-02	3.42E-02	3.55E-02	3.34E-02	3.25E-02	3.50E-02	6.35E-02	4.79E-01	2.02E+00
76	C-3	1.05E-05	5.90E-02	7.78E-02	6.52E-02	6.29E-02	5.92E-02	5.29E-02	5.29E-02	4.95E-02	4.69E-02	4.36E-02	4.94E-02	8.19E-02	7.01E-01	1.80E+00
77	C-3	2.83E-05	2.67E-02	4.75E-02	5.05E-02	4.90E-02	4.83E-02	4.79E-02	4.47E-02	4.41E-02	4.31E-02	4.25E-02	4.00E-02	8.09E-02	5.65E-01	1.93E+00
78	C-3	4.18E-04	4.79E-02	4.52E-02	4.37E-02	4.35E-02	4.67E-02	4.12E-02	4.23E-02	4.17E-02	4.33E-02	4.30E-02	4.52E-02	8.74E-02	5.72E-01	1.93E+00
79	C-3	4.84E-05	4.25E-02	7.60E-02	7.62E-02	5.98E-02	4.92E-02	5.11E-02	4.16E-02	4.10E-02	3.14E-02	2.56E-03	1.40E-01	1.58E-01	7.69E-01	1.73E+00
80	C-3	1.43E-04	3.15E-02	4.48E-02	4.58E-02	4.29E-02	3.86E-02	4.07E-02	3.65E-02	3.80E-02	3.78E-02	3.49E-02	3.93E-02	6.71E-02	4.98E-01	2.00E+00
81	C-3	0.00E+00	2.29E-02	4.45E-02	3.84E-02	3.73E-02	3.25E-02	3.43E-02	3.15E-02	3.47E-02	3.67E-02	3.96E-02	4.15E-02	7.25E-02	4.67E-01	2.03E+00

Tabla 3.27. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 6.3mm, separación 1mm

Tabla 3.28. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 10mm, separación 1mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
82	C-4	6.04E-02	1.03E-01	1.15E-01	1.28E-01	8.57E-02	7.37E-02	6.73E-02	6.27E-02	6.77E-02	6.47E-02	5.60E-02	5.26E-02	1.54E-01	1.09E+00	1.41E+00
83	C-4	1.28E-04	7.68E-02	7.83E-02	7.75E-02	6.18E-02	5.82E-02	5.79E-02	5.60E-02	5.04E-02	5.55E-02	5.17E-02	4.14E-02	1.89E-01	8.55E-01	1.65E+00
84	C-4	0.00E+00	7.37E-02	6.14E-02	5.24E-02	5.00E-02	4.59E-02	4.68E-02	4.69E-02	4.10E-02	4.88E-02	4.37E-02	3.30E-02	2.17E-01	7.61E-01	1.74E+00
85	C-4	2.08E-05	9.47E-02	9.53E-02	7.16E-02	1.40E-01	7.66E-02	6.28E-02	5.78E-02	6.01E-02	5.43E-02	3.99E-02	1.58E-01	1.66E-01	1.08E+00	1.42E+00
86	C-4	2.33E-04	5.88E-02	6.59E-02	6.14E-02	5.67E-02	5.81E-02	5.26E-02	5.53E-02	5.03E-02	4.83E-02	5.19E-02	5.22E-02	9.53E-02	7.07E-01	1.79E+00
87	C-4	0.00E+00	6.14E-02	5.35E-02	4.78E-02	4.72E-02	4.72E-02	4.70E-02	4.69E-02	2.93E-02	2.22E-01	5.39E-02	4.15E-02		6.98E-01	1.54E+00

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
88	C-5	6.05E-02	1.05E-01	1.13E-01	1.20E-01	9.45E-02	9.79E-02	7.99E-02	7.93E-02	7.03E-02	6.41E-02	1.55E-01	5.86E-02	7.99E-02	1.18E+00	1.32E+00
89	C-5	0.00E+00	8.55E-02	9.01E-02	7.92E-02	7.56E-02	6.57E-02	6.72E-02	6.33E-02	4.71E-02	1.80E-01	4.93E-02	5.89E-02	6.05E-02	9.23E-01	1.58E+00
90	C-5	5.70E-05	6.08E-02	6.71E-02	5.52E-02	5.37E-02	5.05E-02	4.94E-02	4.98E-02	4.85E-02	3.40E-02	2.06E-01	2.43E-02	7.19E-02	7.72E-01	1.73E+00
91	C-5	6.86E-02	1.18E-01	1.09E-01	1.33E-01	8.99E-02	7.55E-02	6.46E-02	1.58E-01	1.62E-01	5.62E-02	6.12E-02	1.72E-01	5.17E-02	1.32E+00	1.18E+00
92	C-5	0.00E+00	9.19E-02	1.06E-01	6.74E-02	5.94E-02	5.82E-02	5.95E-02	5.49E-02	5.13E-02	4.77E-02	4.97E-02	5.13E-02	5.87E-02	7.56E-01	1.74E+00

Tabla 3.29. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 12mm, separación 1mm

Tabla 3.30. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 14mm, separación 1mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
93	C-6	3.95E-02	1.08E-01	1.18E-01	8.80E-02	7.35E-02	6.62E-02	5.86E-02	5.49E-02	5.45E-02	4.97E-02	4.54E-02	4.84E-02	5.37E-02	8.58E-01	1.64E+00
94	C-6	8.46E-04	9.44E-02	5.99E-02	3.88E-02	4.21E-02	4.16E-02	4.06E-02	3.42E-02	3.36E-02	3.53E-02	3.04E-02	4.38E-02	4.03E-02	5.36E-01	1.96E+00
95	C-6	8.30E-02	1.18E-01	1.20E-01	9.92E-02	8.70E-02	8.16E-02	8.12E-02	7.47E-02	8.30E-02	6.34E-02	6.86E-02	6.03E-02	1.67E-01	1.19E+00	1.31E+00
96	C-6	2.60E-06	8.65E-02	8.42E-02	7.14E-02	6.72E-02	6.08E-02	5.97E-02	5.98E-02	5.90E-02	5.54E-02	5.69E-02	5.80E-02	6.53E-02	7.84E-01	1.72E+00
97	C-6	8.72E-05	9.20E-02	6.69E-02	5.22E-02	6.14E-02	5.35E-02	5.24E-02	5.87E-02	5.36E-02	5.43E-02	5.37E-02	5.38E-02	6.30E-02	7.16E-01	1.78E+00

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
98	C-7	5.72E-02	1.13E-01	1.15E-01	1.20E-01	1.26E-01	1.31E-01	1.34E-01	9.97E-02	8.32E-02	1.46E-01	5.91E-02	1.50E-01	1.64E-01	1.50E+00	1.00E+00
99	C-7	7.88E-07	1.26E-01	1.42E-01	1.15E-01	1.34E-01	8.92E-02	6.00E-02	1.62E-01	4.07E-02	7.43E-02	1.80E-01	2.46E-02	2.00E-01	1.35E+00	1.15E+00
100	C-7	9.23E-02	1.80E-01	1.79E-01	1.91E-01	3.43E-02	1.98E-01	2.00E-01	2.27E-01	2.08E-01	5.77E-02	2.15E-01	5.90E-04	2.12E-01	1.99E+00	5.05E-01
101	C-7	4.56E-02	1.12E-01	1.17E-01	1.28E-01	1.33E-01	8.83E-02	1.27E-01	9.61E-02	7.13E-02	1.52E-01	5.49E-02	1.39E-01	1.68E-01	1.43E+00	1.07E+00
102	C-7	0.00E+00	1.35E-01	9.63E-02	7.79E-02	8.92E-02	6.63E-02	1.36E-01	7.37E-02	5.22E-02	6.92E-02	1.80E-01	2.04E-01	2.33E-01	1.41E+00	1.09E+00

Tabla 3.31. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 16mm, separación 1mm

Tabla 3.32. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 20mm, separación 1mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
103	C-8	3.02E-02	1.08E-01	1.16E-01	1.22E-01	1.28E-01	1.01E-01	1.35E-01	1.14E-01	1.43E-01	1.27E-01	1.23E-01	1.42E-01	1.40E-01	1.53E+00	9.71E-01
104	C-8	1.91E-02	1.18E-01	1.42E-01	1.49E-01	1.24E-01	1.61E-01	8.22E-02	1.52E-01	1.66E-01	1.68E-01	1.48E-01	1.45E-01	1.96E-01	1.77E+00	7.30E-01
105	C-8	6.41E-04	1.57E-01	1.49E-01	1.74E-01	1.44E-01	1.66E-01	1.63E-01	1.66E-01	1.56E-01	8.10E-02	2.11E-01	2.16E-01	2.36E-01	2.02E+00	4.82E-01
106	C-8	2.23E-02	1.13E-01	1.18E-01	1.30E-01	1.38E-01	1.42E-01	1.40E-01	1.29E-01	1.25E-01	1.35E-01	1.56E-01	1.36E-01	1.64E-01	1.65E+00	8.53E-01
107	C-8	1.34E-02	1.13E-01	1.45E-01	1.39E-01	1.47E-01	1.75E-01	1.81E-01	1.74E-01	1.70E-01	2.02E-01	2.73E-02	2.07E-01	2.20E-01	1.91E+00	5.88E-01

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
108	C-9	7.56E-04	3.30E-02	4.67E-02	5.22E-02	5.22E-02	5.51E-02	5.56E-02	5.34E-02	5.26E-02	5.16E-02	5.10E-02	5.07E-02	8.30E-02	6.38E-01	1.86E+00
109	C-9	9.80E-05	2.23E-02	3.48E-02	3.97E-02	4.42E-02	4.50E-02	4.46E-02	4.63E-02	4.54E-02	4.48E-02	4.37E-02	4.51E-02	8.01E-02	5.36E-01	1.96E+00
110	C-9	1.30E-05	8.42E-03	3.36E-02	3.28E-02	3.48E-02	3.59E-02	3.68E-02	3.71E-02	3.73E-02	3.71E-02	3.75E-02	3.92E-02	7.76E-02	4.48E-01	2.05E+00
111	C-9	3.57E-03	2.94E-02	4.49E-02	5.46E-02	5.69E-02	5.60E-02	5.91E-02	5.78E-02	5.32E-02	5.43E-02	5.30E-02	5.80E-02	9.85E-02	6.79E-01	1.82E+00
112	C-9	7.20E-04	1.64E-02	3.49E-02	4.21E-02	4.64E-02	5.22E-02	5.06E-02	5.42E-02	5.30E-02	5.29E-02	5.27E-02	5.75E-02	1.04E-01	6.17E-01	1.88E+00
113	C-9	3.55E-04	2.60E-02	3.69E-02	4.14E-02	4.54E-02	4.67E-02	4.93E-02	5.04E-02	5.01E-02	5.14E-02	5.25E-02	5.46E-02	1.05E-01	6.10E-01	1.89E+00
114	C-9	2.21E-04	3.26E-02	4.27E-02	4.40E-02	4.79E-02	4.93E-02	4.95E-02	4.91E-02	4.97E-02	4.96E-02	5.01E-02	4.90E-02	8.37E-02	5.97E-01	1.90E+00
115	C-9	5.50E-05	1.57E-02	2.97E-02	3.29E-02	3.80E-02	4.20E-02	3.96E-02	4.09E-02	4.00E-02	4.07E-02	4.11E-02	4.07E-02	7.80E-02	4.79E-01	2.02E+00
116	C-9	3.54E-04	2.48E-02	3.27E-02	3.40E-02	3.69E-02	3.90E-02	4.03E-02	3.97E-02	4.10E-02	4.07E-02	4.07E-02	4.30E-02	8.59E-02	4.99E-01	2.00E+00

Tabla 3.33. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 3mm, separación 2mm

Tabla 3.34. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 5mm, separación 2mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
117	C-10	1.54E-03	4.75E-02	6.47E-02	6.73E-02	6.72E-02	6.35E-02	6.10E-02	5.43E-02	5.40E-02	5.00E-02	4.81E-02	4.55E-02	8.70E-02	7.12E-01	1.79E+00
118	C-10	4.32E-05	4.00E-02	4.97E-02	5.29E-02	5.18E-02	4.48E-02	4.13E-02	4.18E-02	3.89E-02	3.86E-02	3.89E-02	3.64E-02	7.70E-02	5.52E-01	1.95E+00
119	C-10	6.64E-05	3.39E-02	5.06E-02	4.14E-02	4.69E-02	3.79E-02	3.77E-02	3.75E-02	4.29E-02	3.38E-02	3.56E-02	3.46E-02	7.27E-02	5.05E-01	1.99E+00
120	C-10	1.03E-04	4.39E-02	6.28E-02	6.39E-02	6.37E-02	6.03E-02	5.81E-02	5.56E-02	5.20E-02	5.06E-02	4.99E-02	5.00E-02	8.80E-02	6.99E-01	1.80E+00
121	C-10	4.48E-04	2.37E-02	4.84E-02	5.03E-02	4.88E-02	4.81E-02	4.61E-02	4.46E-02	4.33E-02	4.21E-02	4.19E-02	4.24E-02	8.24E-02	5.63E-01	1.94E+00
122	C-10	5.21E-04	4.16E-02	4.25E-02	4.29E-02	4.21E-02	4.17E-02	4.14E-02	4.12E-02	4.09E-02	4.08E-02	4.08E-02	4.16E-02	8.40E-02	5.42E-01	1.96E+00
123	C-10	2.00E-03	4.31E-02	5.42E-02	5.44E-02	5.45E-02	5.21E-02	4.90E-02	5.39E-02	4.56E-02	3.99E-02	4.85E-02	4.97E-02	7.86E-02	6.26E-01	1.87E+00
124	C-10	8.17E-05	3.57E-02	4.48E-02	4.33E-02	4.29E-02	4.06E-02	5.00E-02	3.62E-02	3.61E-02	3.66E-02	3.50E-02	3.76E-02	6.98E-02	5.09E-01	1.99E+00
125	C-10	6.10E-04	3.98E-02	4.80E-02	3.71E-02	3.78E-02	3.73E-02	3.72E-02	3.85E-02	4.00E-02	3.80E-02	3.74E-02	3.93E-02	7.78E-02	5.09E-01	1.99E+00

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
126	C-11	6.22E-04	6.88E-02	7.49E-02	7.82E-02	7.71E-02	6.77E-02	6.41E-02	6.13E-02	5.53E-02	5.11E-02	5.40E-02	5.01E-02	8.62E-02	7.90E-01	1.71E+00
127	C-11	3.27E-04	4.59E-02	5.36E-02	6.17E-02	5.18E-02	5.46E-02	4.79E-02	4.48E-02	4.06E-02	3.97E-02	4.29E-02	4.05E-02	7.58E-02	6.00E-01	1.90E+00
128	C-11	1.15E-04	3.79E-02	4.30E-02	4.29E-02	3.97E-02	3.51E-02	4.04E-02	3.64E-02	3.73E-02	3.45E-02	4.24E-02	3.47E-02	7.33E-02	4.98E-01	2.00E+00
129	C-11	7.60E-04	5.54E-02	6.91E-02	6.50E-02	6.67E-02	6.07E-02	5.57E-02	5.27E-02	5.50E-02	4.99E-02	4.84E-02	5.63E-02	8.67E-02	7.22E-01	1.78E+00
130	C-11	1.70E-04	4.11E-02	5.45E-02	5.30E-02	5.58E-02	5.33E-02	4.78E-02	4.60E-02	4.84E-02	4.62E-02	4.46E-02	3.91E-02	8.33E-02	6.13E-01	1.89E+00
131	C-11	3.36E-04	6.52E-02	7.32E-02	5.83E-02	5.46E-02	5.24E-02	5.14E-02	5.05E-02	4.82E-02	4.78E-02	4.57E-02	4.96E-02	9.07E-02	6.88E-01	1.81E+00
132	C-11	5.41E-04	5.22E-02	6.54E-02	6.40E-02	5.62E-02	5.30E-02	5.24E-02	4.92E-02	4.48E-02	4.19E-02	4.17E-02	4.73E-02	8.42E-02	6.53E-01	1.85E+00
133	C-11	1.92E-04	3.84E-02	4.91E-02	4.40E-02	4.47E-02	3.90E-02	3.91E-02	3.74E-02	3.69E-02	3.71E-02	3.39E-02	4.85E-02	7.35E-02	5.22E-01	1.98E+00
134	C-11	2.73E-04	3.37E-02	4.57E-02	4.01E-02	4.04E-02	3.82E-02	3.76E-02	3.81E-02	3.83E-02	3.84E-02	3.90E-02	4.03E-02	7.42E-02	5.04E-01	2.00E+00

Tabla 3.35. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 6.3mm, separación 2mm

Tabla 3.36. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 10mm, separación 2mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
135	C-12	2.16E-04	9.73E-02	1.11E-01	1.00E-01	9.18E-02	8.03E-02	8.27E-02	7.14E-02	6.28E-02	6.11E-02	6.04E-02	6.11E-02	1.07E-01	9.88E-01	1.51E+00
136	C-12	2.48E-04	7.58E-02	7.74E-02	7.23E-02	6.60E-02	6.53E-02	6.43E-02	6.02E-02	6.12E-02	5.58E-02	4.87E-02	4.72E-02	9.92E-02	7.94E-01	1.71E+00
137	C-12	2.17E-03	8.39E-02	5.47E-02	5.34E-02	4.69E-02	5.45E-02	5.41E-02	4.86E-02	4.82E-02	4.97E-02	5.00E-02	4.75E-02	9.27E-02	6.86E-01	1.81E+00
138	C-12	0.001443	0.101615	0.100356	0.104901	0.081967	0.068349	0.072048	0.063567	0.08375	0.060275	0.056101	0.067716	0.101572	9.64E-01	1.53634
139	C-12	0.000383	0.072314	0.066128	0.063373	0.060824	0.064867	0.059409	0.048758	0.074389	0.0419	0.050049	0.049797	0.079603	7.32E-01	1.768206
140	C-12	0.005958	0.080481	0.046796	0.054609	0.056318	0.050948	0.052134	0.042922	0.055993	0.03952	0.046394	0.057509	0.100996	6.91E-01	1.809421

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
141	C-13	0.001227	0.12875	0.126755	0.116201	0.094624	0.085922	0.07771	0.074804	0.070626	0.069392	0.065364	0.065438	0.072735	1.05E+00	1.450451
142	C-13	0.000696	0.104707	0.085325	0.069601	0.067725	0.060728	0.062662	0.060417	0.058379	0.056246	0.05551	0.055437	0.063542	8.01E-01	1.699025
143	C-13	0.001961	0.104659	0.055577	0.054731	0.052945	0.050434	0.050317	0.048928	0.049515	0.047873	0.046852	0.047108	0.056073	6.67E-01	1.833027
144	C-13	0.030932	0.130366	0.115931	0.087515	0.081324	0.073249	0.068722	0.066138	0.064401	0.063065	0.058942	0.03706	0.05	9.28E-01	1.57E+00
145	C-13	0.000711	0.096409	0.07462	0.063002	0.06063	0.060444	0.055841	0.05676	0.051101	0.051696	0.050248	0.049208	0.061527	7.32E-01	1.767804

Tabla 3.37. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 12mm, separación 2mm

Tabla 3.38. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 14mm, separación 2mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
146	C-14	0.019326	0.161154	0.120033	0.099529	0.086816	0.080173	0.081009	0.076241	0.073262	0.066858	0.065129	0.066218	0.080062	1.08E+00	1.42419
147	C-14	0.001818	0.129103	0.09184	0.077665	0.071374	0.070857	0.066671	0.061633	0.068086	0.058243	0.062909	0.061741	0.066796	8.89E-01	1.611264
148	C-14	0.006846	0.119375	0.058601	0.062659	0.060242	0.060835	0.057143	0.060982	0.060389	0.055645	0.07318	0.067534	0.062307	8.06E-01	1.694263
149	C-14	0.000608	0.141921	0.124514	0.101744	0.091592	0.085271	0.079182	0.075679	0.074758	0.070287	0.063801	0.062108	0.070148	1.04E+00	1.458388
150	C-14	0.001286	0.054829	0.053547	0.058515	0.060163	0.097119	0.081981	0.06856	0.064635	0.060858	0.060171	0.058099	0.054862	7.75E-01	1.725374

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
151	C-15	0.017099	0.1856	0.156401	0.127488	0.117449	0.099297	0.101907	0.089482	0.08714	0.088777	0.088338	0.080449	0.139472	1.38E+00	1.121101
152	C-15	0.015539	0.159796	0.112081	0.101776	0.0984	0.093871	0.091061	0.092331	0.082651	0.085958	0.077398	0.07459	0.109576	1.20E+00	1.304973
153	C-15	0.000901	0.136086	0.089417	0.087128	0.084041	0.088571	0.085138	0.084375	0.082173	0.080807	0.080896	0.075807	0.10588	1.08E+00	1.418779
154	C-15	0.016064	0.165071	0.132824	0.10042	0.087952	0.088702	0.077339	0.076218	0.072839	0.062505	0.070413	0.079472	0.151907	1.18E+00	1.318275
155	C-15	0.001886	0.126633	0.083081	0.073478	0.072343	0.064015	0.0608	0.057164	0.04886	0.047227	0.05334	0.046867	0.169043	9.05E-01	1.595263

Tabla 3.39. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 16mm, separación 2mm

Tabla 3.40. Resultados CFD de caudales capturados por cada ranura de la reja de barras de sección circular, diámetro 20mm, separación 2mm

CASO #	REJA	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13	Δq	q salida
									L/s							
156	C-16	0.018206	0.248807	0.166465	0.131707	0.115614	0.109214	0.103383	0.098225	0.096582	0.091077	0.093592	0.091826	0.357943	1.72E+00	0.777357
157	C-16	0.016798	0.180349	0.099226	0.099695	0.089282	0.087755	0.087988	0.097944	0.088595	0.079925	0.07565	0.074199	0.159868	1.24E+00	1.262727
158	C-16	0.000701	0.196981	0.060315	0.089269	0.07312	0.097114	0.065818	0.076462	0.071051	0.072047	0.055325	0.087593	0.174678	1.12E+00	1.379527
159	C-16	0.023054	0.194511	0.132754	0.107253	0.107836	0.103235	0.093643	0.085051	0.085778	0.089383	0.083515	0.076484	0.388476	1.57E+00	0.929028
160	C-16	0.005966	0.163727	0.079696	0.086691	0.088134	0.074426	0.065658	0.070286	0.057947	0.067835	0.073599	0.186335	0.07684	1.10E+00	1.402862



Figura 3.25. Resultados CFD reja circular diámetro 5mm; separación 2mm; zona alta; (a) contornos de fracción de volumen de las fases agua-aire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión.



Figura 3.26. Resultados CFD reja circular diámetro 5mm; separación 2mm; zona media; (a) contornos de fracción de volumen de las fases agua-aire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión.



Figura 3.27. Resultados CFD reja circular diámetro 5mm; separación 2mm; zona baja; (a) contornos de fracción de volumen de las fases agua-aire; (b) contornos de velocidad; (c) contornos de presión.

En los contornos de fracción de volumen de las fases agua-aire de las figuras 3.25(a), 3.26(a) y 3.27(a), se puede observar como la profundidad del agua sobre la reja disminuye conforme la ubicación de la reja desciende en el canal, precisamente este fue el objeto de modificar la posición de las rejas. Otra variable que genera un efecto similar es la inclinación del canal. Los contornos de velocidad mostrados en las figuras 3.25(b), 3.26(b) y 3.27(b), demuestran una tendencia incremental de la velocidad conforme la posición de la reja desciende, la velocidad máxima se alcanza en la zona baja del canal. Los contornos de presión mostrados en las figuras 3.25(c), 3.26(c) y 3.27(c), demuestran una tendencia incremental de la posición de la reja desciende, la presión conforme la posición de la reja desciende de las rejas figuras 3.25(c), 3.26(c) y 3.27(c), demuestran una tendencia incremental de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme la posición de la reja descienda de la presión conforme de la presión de la reja descienda de la presión conforme de la presión de la reja descienda de la presión de la reja descienda de la presión de la reja descienda de la p

Los resultados de las simulaciones CFD permiten determinar los caudales captados por cada ranura de la reja, con esto es posible evaluar la tendencia de los caudales conforme el flujo avanza sobre cada barra y cada ranura. En las figuras 3.28, 3.29 y 3.30 se presentan las gráficas de los caudales individuales capturados por 8 ranuras de la reja de barras de sección circular de 5mm de diámetro, separación de 2mm, con inclinaciones de 20, 35 y 45 grados respectivamente.



Figura 3.28. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección circular, θ = 20°; diámetro 5mm; separación 2mm.



Figura 3.29. Tendencia de caudales captados en reja de barras de sección circular, θ = 35°; diámetro 5mm; separación 2mm.





En las figuras 3.28, 3.29 y 3.30, se observa que el caudal captado por cada ranura de la reja de barras de sección circular es diferente. El caudal captado por cada ranura presenta una tendencia decreciente conforme el flujo avanza sobre las barras. La primera ranura capta mayor caudal y disminuye progresivamente para las siguientes ranuras. La tendencia decreciente se mantiene tanto para la posición, como para la inclinación de la reja. La mayor eficiencia se presenta en la zona alta del canal lo que

demuestra que la capacidad de captación de una reja de barras de sección circular es aproximadamente proporcional al tirante del fluido. La proporcionalidad respecto a la velocidad tiene un comportamiento contrario.

El comportamiento del flujo y el rendimiento de las rejas de barras de sección circular es función de diferentes variables geométricas. Al igual que las rejas de barras de sección triangular, la eficiencia de la reja viene determinada por la relación entre el caudal total captado (Δ q) y el caudal total suministrado por el canal (Q1). Se exploró la influencia de los números de Froude y Reynolds sobre Δ q/Q1.

El número de Froude se calculó con el ajuste de pendiente presentado en [25]

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD\cos\theta}}$$

Donde

F= número de Froude

V = velocidad media a través de la reja;

D = profundidad de flujo;

 θ = ángulo de inclinación de la superficie de la reja, medido desde la horizontal;

g = aceleración de la gravedad;

Los números de Reynolds se calcularon utilizando como velocidad de referencia, la velocidad de flujo promedio a través de la reja y el ancho de la ranura como la longitud de referencia, esta longitud presentó las mejores correlaciones.

$$R = \frac{Vs}{v}$$

Donde

R = número de Reynolds;

V = velocidad media a través de la reja;

s = ancho de ranura entre barras;

v = viscosidad cinemática;

En las tablas 3.41 a 3.56 se presentan los resultados CFD de las velocidades a la entrada y a la salida de las rejas de barras de sección circular, V1 y V2 respectivamente. De igual forma se presentan los tirantes correspondientes, Y1 y Y2. A partir de estos resultados se obtienen las velocidades y tirantes promedio que permiten calcular los

números de Froude y Reynolds para cada caso simulado. En la columna final de cada tabla se presenta la relación de caudal captado por la reja sobre el caudal total suministrado (Δ q/Q1).

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
55	C-1	20	alta	1.82	2.04	1.47E-02	1.03E-02	5.69	1923.38	0.216
56	C-1	20	media	2.51	2.70	1.07E-02	8.35E-03	8.80	2595.16	0.161
57	C-1	20	baja	3.08	3.22	8.72E-03	7.24E-03	11.63	3138.56	0.132
58	C-1	35	alta	1.82	2.11	1.48E-02	1.03E-02	6.18	1953.43	0.191
59	C-1	35	media	2.58	2.82	1.04E-02	8.12E-03	9.89	2686.44	0.149
60	C-1	35	baja	3.31	3.50	8.12E-03	6.69E-03	13.95	3387.02	0.130
61	C-1	45	alta	1.82	2.15	1.47E-02	1.01E-02	6.77	1978.92	0.191
62	C-1	45	media	2.60	2.87	1.03E-02	8.03E-03	10.83	2719.89	0.144
63	C-1	45	baja	3.38	3.59	7.94E-03	6.57E-03	15.55	3472.35	0.121

 Tabla 3.41. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular, diámetro 3mm, separación entre barras 1mm

Tabla 3.42. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular, diámetro 5mm, separación entre barras 1mm

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
64	C-2	20	alta	1.82	2.09	1.48E-02	9.42E-03	5.85	1944.66	0.269
65	C-2	20	media	2.51	2.74	1.07E-02	7.83E-03	8.99	2614.14	0.202
66	C-2	20	baja	3.08	3.25	8.72E-03	6.93E-03	11.79	3151.86	0.162
67	C-2	35	alta	1.82	2.17	1.48E-02	9.07E-03	6.44	1985.91	0.267
68	C-2	35	media	2.58	2.88	1.04E-02	7.17E-03	10.27	2718.23	0.231
69	C-2	35	baja	3.28	3.54	8.19E-03	5.90E-03	14.35	3397.13	0.222
70	C-2	45	alta	1.82	2.23	1.47E-02	9.48E-03	6.99	2016.87	0.213
71	C-2	45	media	2.60	2.93	1.03E-02	7.55E-03	11.10	2751.82	0.177
72	C-2	45	baja	3.39	3.68	7.94E-03	6.14E-03	15.98	3514.03	0.160

CASO #	REJA	s (mm)	⊖ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
73	C-3	1	20	alta	1.82	2.11	1.48E-02	8.92E-03	5.96	1957.92	0.299
74	C-3	1	20	media	2.51	2.76	1.07E-02	7.48E-03	9.12	2625.87	0.231
75	C-3	1	20	baja	3.08	3.27	8.72E-03	6.64E-03	11.94	3161.40	0.192
76	C-3	1	35	alta	1.82	2.21	1.48E-02	8.74E-03	6.55	2005.44	0.281
77	C-3	1	35	media	2.58	2.91	1.04E-02	7.15E-03	10.33	2731.18	0.226
78	C-3	1	35	baja	3.31	3.58	8.11E-03	5.79E-03	14.59	3431.33	0.229
79	C-3	1	45	alta	1.82	2.28	1.47E-02	8.15E-03	7.28	2043.11	0.308
80	C-3	1	45	media	2.60	2.97	1.03E-02	7.25E-03	11.27	2771.04	0.199
81	C-3	1	45	baja	3.38	3.68	7.94E-03	5.94E-03	16.10	3516.35	0.187

Tabla 3.44. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 10mm,separación entre barras 1mm

CASO #	REJA	⊖ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
82	C-4	20	alta	1.82	2.18	1.48E-02	6.96E-03	6.32	1991.03	0.436
83	C-4	20	media	2.51	2.83	1.07E-02	6.25E-03	9.56	2658.12	0.342
84	C-4	20	baja	3.08	3.32	8.72E-03	5.63E-03	12.46	3187.82	0.304
85	C-4	35	alta	1.82	2.32	1.48E-02	6.58E-03	7.07	2060.86	0.431
86	C-4	35	media	2.58	3.00	1.04E-02	6.44E-03	10.71	2774.63	0.283
87	C-4	35	baja	3.31	3.67	8.11E-03	4.51E-03	15.50	3475.15	0.279

Tabla 3.45. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 12mm,

 separación entre barras 1mm

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
88	C-5	20	alta	1.82	2.22	1.47E-02	6.40E-03	6.48	2012.31	0.471
89	C-5	20	media	2.51	2.86	1.07E-02	5.93E-03	9.70	2672.78	0.369
90	C-5	20	baja	3.08	3.33	8.72E-03	5.57E-03	12.50	3192.41	0.309
91	C-5	35	alta	1.82	2.39	1.48E-02	5.31E-03	7.40	2091.93	0.528
92	C-5	35	media	2.58	3.04	1.04E-02	6.17E-03	10.89	2797.15	0.303

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
93	C-6	20	alta	1.82	2.26	1.48E-02	7.82E-03	6.32	2030.09	0.343
94	C-6	20	media	2.51	2.84	1.07E-02	7.44E-03	9.25	2661.90	0.214
95	C-6	35	alta	1.82	2.44	1.48E-02	5.79E-03	7.40	2117.98	0.475
96	C-6	35	media	2.58	3.08	1.04E-02	5.99E-03	11.02	2816.00	0.314
97	C-6	35	baja	3.28	3.65	8.19E-03	5.25E-03	14.92	3451.30	0.286

Tabla 3.46. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 14mm, separación entre barras 1mm

Tabla 3.47. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 16mm, separación entre barras 1mm

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
98	C-7	20	alta	1.82	2.28	1.48E-02	4.73E-03	6.84	2040.40	0.599
99	C-7	20	media	2.51	2.93	1.07E-02	4.23E-03	10.37	2707.30	0.539
101	C-7	35	alta	1.82	2.48	1.48E-02	4.63E-03	7.69	2138.83	0.573
102	C-7	35	media	2.58	3.12	1.04E-02	3.75E-03	11.94	2836.36	0.565

 Tabla 3.48.
 Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 20mm, separación entre barras 1mm

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	∆q/Q1
103	C-8	20	alta	1.82	2.35	1.48E-02	4.45E-03	7.00	2074.04	0.612
104	C-8	20	media	2.51	2.95	1.07E-02	2.66E-03	11.02	2719.95	0.708
105	C-8	20	baja	3.08	3.27	8.71E-03	1.59E-03	14.57	3159.59	0.807
106	C-8	35	alta	1.82	2.57	1.48E-02	3.57E-03	8.08	2182.60	0.659
107	C-8	35	media	2.58	3.09	1.04E-02	2.05E-03	12.67	2822.56	0.765

CASO #	REJA	⊖ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
108	C-9	20	alta	1.82	2.07	1.48E-02	9.68E-03	5.80	3871.27	0.255
109	C-9	20	media	2.51	2.73	1.07E-02	7.74E-03	8.99	5218.09	0.214
110	C-9	20	baja	3.08	3.25	8.72E-03	6.79E-03	11.84	6299.56	0.179
111	C-9	35	alta	1.82	2.15	1.48E-02	9.12E-03	6.39	3944.57	0.272
112	C-9	35	media	2.58	2.86	1.04E-02	7.07E-03	10.27	5418.52	0.247
113	C-9	35	baja	3.31	3.55	8.12E-03	5.73E-03	14.53	6824.34	0.244
114	C-9	45	alta	1.82	2.20	1.47E-02	9.31E-03	6.96	4001.70	0.239
115	C-9	45	media	2.60	2.91	1.03E-02	7.47E-03	11.09	5484.05	0.192
116	C-9	45	baja	3.38	3.64	7.95E-03	5.91E-03	16.03	6992.58	0.200

Tabla 3.49. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 3mm, separación entre barras 2mm

Tabla 3.50. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 5mm, separación entre barras 2mm

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
117	C-10	20	alta	1.82	2.11	1.48E-02	9.13E-03	5.92	3910.64	0.285
118	C-10	20	media	2.51	2.76	1.07E-02	7.60E-03	9.07	5243.15	0.221
119	C-10	20	baja	3.08	3.27	8.72E-03	6.56E-03	11.96	6319.47	0.202
120	C-10	35	alta	1.82	2.21	1.48E-02	8.77E-03	6.54	4005.90	0.280
121	C-10	35	media	2.58	2.90	1.04E-02	7.18E-03	10.31	5457.03	0.225
122	C-10	35	baja	3.32	3.57	8.10E-03	5.89E-03	14.53	6858.99	0.217
123	C-10	45	alta	1.82	2.27	1.47E-02	8.88E-03	7.15	4073.80	0.250
124	C-10	45	media	2.60	2.96	1.03E-02	7.22E-03	11.27	5538.32	0.203
125	C-10	45	baja	3.39	3.69	7.94E-03	5.81E-03	16.20	7038.92	0.204

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
126	C-11	20	alta	1.82	2.13	1.48E-02	8.62E-03	6.03	3936.87	0.316
127	C-11	20	media	2.51	2.78	1.07E-02	7.36E-03	9.17	5264.18	0.240
128	C-11	20	baja	3.08	3.28	8.72E-03	6.57E-03	11.98	6331.56	0.199
129	C-11	35	alta	1.82	2.25	1.48E-02	8.51E-03	6.64	4043.68	0.289
130	C-11	35	media	2.58	2.93	1.04E-02	6.91E-03	10.45	5488.41	0.245
131	C-11	35	baja	3.31	3.28	8.11E-03	5.94E-03	13.88	6564.77	0.275
132	C-11	45	alta	1.82	2.32	1.47E-02	8.57E-03	7.28	4119.91	0.261
133	C-11	45	media	2.60	3.00	1.03E-02	7.10E-03	11.38	5571.63	0.209
134	C-11	45	baja	3.38	3.70	7.94E-03	5.81E-03	16.21	7047.43	0.202

Tabla 3.51. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 6.3mm, separación entre barras 2mm

Tabla 3.52. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 10mm, separación entre barras 2mm

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
135	C-12	20	alta	1.82	2.20	1.48E-02	7.39E-03	6.30	4003.31	0.395
136	C-12	20	media	2.51	2.83	1.07E-02	6.47E-03	9.50	5320.90	0.318
137	C-12	20	baja	3.08	3.32	8.72E-03	5.87E-03	12.35	6375.55	0.275
138	C-12	35	alta	1.82	2.35	1.48E-02	7.02E-03	7.04	4150.36	0.385
139	C-12	35	media	2.58	3.02	1.04E-02	6.31E-03	10.79	5569.13	0.293
140	C-12	35	baja	3.31	3.65	8.11E-03	5.33E-03	14.99	6933.66	0.276

Tabla 3.53. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 12mm, separación entre barras 2mm

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
141	C-13	20	alta	1.82	2.24	1.48E-02	6.96E-03	6.42	4044.55	0.420
142	C-13	20	media	2.51	2.86	1.07E-02	6.39E-03	9.57	5345.09	0.320
143	C-13	20	baja	3.08	3.33	8.72E-03	5.92E-03	12.34	6381.27	0.267
144	C-13	35	alta	1.82	2.42	1.48E-02	6.99E-03	7.16	4215.51	0.371
145	C-13	35	media	2.58	3.06	1.04E-02	6.22E-03	10.90	5608.45	0.293

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
146	C-14	20	alta	1.82	2.28	1.47E-02	6.72E-03	6.52	4082.34	0.430
147	C-14	20	media	2.51	2.89	1.07E-02	6.00E-03	9.72	5371.36	0.355
148	C-14	20	baja	3.08	3.35	8.72E-03	5.43E-03	12.60	6403.88	0.322
149	C-14	35	alta	1.82	2.47	1.48E-02	6.35E-03	7.36	4268.40	0.417
150	C-14	35	media	2.58	3.10	1.04E-02	5.99E-03	11.05	5649.42	0.310

Tabla 3.54. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 14mm, separación entre barras 2mm

Tabla 3.55. Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 16mm, separación entre barras 2mm

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
151	C-15	20	alta	1.82	2.30	1.47E-02	5.25E-03	6.79	4100.38	0.552
152	C-15	20	media	2.51	2.93	1.07E-02	4.79E-03	10.17	5412.71	0.478
153	C-15	20	baja	3.08	3.38	8.71E-03	4.52E-03	13.09	6432.25	0.432
154	C-15	35	alta	1.82	2.51	1.48E-02	5.65E-03	7.55	4306.54	0.473
155	C-15	35	media	2.58	3.14	1.04E-02	5.46E-03	11.33	5694.44	0.362

 Tabla 3.56.
 Variables hidráulicas de rejas de barras de sección circular diámetro 20mm, separación entre barras 2mm

CASO #	REJA	Θ (°)	Zona	V1 (m/s)	V2 (m/s)	Y1 (m)	Y2 (m)	F	R	Δq/Q1
156	C-16	20	alta	1.82	2.34	1.48E-02	3.58E-03	7.15	4138.34	0.689
157	C-16	20	media	2.51	2.97	1.07E-02	4.57E-03	10.33	5455.25	0.495
158	C-16	20	baja	3.08	3.41	8.73E-03	4.35E-03	13.22	6458.65	0.448
159	C-16	35	alta	1.82	2.59	1.48E-02	3.86E-03	8.04	4382.20	0.628
160	C-16	35	media	2.58	3.21	1.04E-02	4.69E-03	11.75	5765.48	0.439

En las figuras 3.31 a 3.36, se presentan las relaciones entre Δq/Q1 versus los números de Froude y de Reynolds para las rejas de barras de sección circular. En la mayoría de los casos, las barras de sección triangular y circular se comportan de manera opuesta; se evidencia una relación aproximadamente inversa entre el flujo capturado por las rejas de barras de sección circular y los números de Froude y de Reynolds. El flujo capturado por la reja de barra de sección circular disminuye a medida que aumentan los valores de los números de Froude y de Reynolds. Los valores de caudal más altos ocurren para

pendientes de canal y velocidades de flujo bajas (es decir, rejas instaladas en las posiciones de prueba superiores).



Figura 3.31. Relaciones entre $\Delta q/Q1$ y número de Froude para rejas de barras de sección circular de 2mm de diámetro


Figura 3.32. Relaciones entre $\Delta q/Q1$ y número de Froude para rejas de barras de sección circular de 1mm de diámetro



Figura 3.33. Relaciones entre $\Delta q/Q1$ y número de Froude para rejas de barras de sección circular.



Figura 3.34. Relaciones entre $\Delta q/Q1$ y número de Reynolds para rejas de barras de sección circular de 1mm de diámetro



Figura 3.35. Relaciones entre $\Delta q/Q1$ y número de Reynolds para rejas de barras de sección circular de 2mm de diámetro



Figura 3.36. Relaciones entre $\Delta q/Q1$ y número de Reynolds para rejas de barras de sección circular

Al igual que la reja de barras de sección triangular, una reja de barras de sección circular tiene una relación aproximadamente proporcional entre el diámetro de la barra y el caudal capturado, manteniendo la tendencia relativa a los números de Froude y Reynolds. Los diámetros de barras más grandes aumentan la superficie de contacto y la longitud de la reja, lo que aumenta la capacidad de captación. La experimentación numérica generó resultados consistentes en barras de hasta 20 mm de diámetro con una ranura de barra de 2 mm; la simulación de barras con una ranura de 1 mm se

restringió a 10 mm de diámetro debido a irregularidades como vórtices y flujo inverso en las barras con un diámetro de 16 mm y superior. Por este motivo, estos resultados no se han considerado en la figura 3.36.

Con el 70% del caudal captado, la malla de barra de 20 mm de diámetro con ranura de 2 mm ubicada en la posición superior del canal, con una inclinación de 20 grados, es la que presenta el mejor desempeño en cuanto a captación de agua limpia.

La malla de barra de 3 mm de diámetro con ranura de 1 mm situada en la posición inferior del canal, con una pendiente de 45 grados, capta el 12 % del caudal y presenta la menor eficiencia en cuanto a captación de agua limpia.

Los experimentos numéricos con rejas de barras circulares han demostrado que aumentar el tamaño de las barras manteniendo la separación aumenta la eficiencia del flujo capturado a un nivel similar al de las rejas de barras triangulares.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones generales

En la presente investigación se estudió el funcionamiento hidrodinámico de rejas de fondo con barras transversales al flujo, se utilizó como base la reja de efecto Coanda con barras estándar de sección triangular o tipo cuña y se propusieron dos formas de barras alternativas de sección circular y semicircular. El objeto principal fue determinar la eficiencia de las rejas en cuanto a captación de agua limpia, así como a la remoción de sedimento y su uso está orientado especialmente a la captación de agua superficial para consumo en poblaciones rurales menores a 1000 habitantes, sin embargo, puede extenderse a otros fines como captaciones de agua superficial para riego o filtración de agua lluvias en drenajes urbanos.

Las características más relevantes de las rejas estudiadas y que las diferencian considerablemente de las rejas de fondo convencionales, son la disposición de las barras respecto al sentido del flujo, la inclinación longitudinal y la separación entre barras. Las rejas convencionales con barras paralelas al sentido del flujo tienen restricciones en cuanto a la pendiente, varios autores coinciden y recomiendan pendientes de alrededor del 20%, mientras que las rejas de barras transversales al flujo pueden trabajar eficientemente con pendientes mayores, incluso superiores al 100%, en el presente trabajo se han evaluado pendientes de 44.44%, 77.78% y 100%, que corresponden a ángulos de 20, 35 y 45° respectivamente. Otro factor relevante y que influye en gran medida en la remoción de sedimentos, es la separación entre barras, en el caso de rejas convencionales, la separación es del orden de centímetros, según la literatura técnica consultada el valor mínimo recomendado es de 2cm, este depende del uso que se vaya a dar al agua captada y puede alcanzar valores de 15cm o más, mientras que en las rejas de barras transversales la separación es del orden de milímetros, la ranura estándar es de 1mm y en la presente investigación se evaluaron separaciones de 2 y 1mm.

La barra de forma triangular o tipo cuña, es la sección estándar comercial que se utiliza en las rejas de efecto Coanda, los estudios de laboratorio realizados con este tipo de rejas demuestran su eficiencia en cuanto a captación de agua limpia y remoción de sedimentos. Sin embargo, su uso es limitado en países en desarrollo como Ecuador, debido especialmente al desconocimiento y falta de información técnica sobre su diseño, y principalmente a la limitada disponibilidad comercial.

Una importante ventaja de las rejas convencionales sobre las rejas de efecto Coanda, es la abundante literatura técnica y metodologías de diseño existentes, a esto se suma la facilidad constructiva, estas rejas pueden fabricarse fácilmente de manera artesanal con barras de secciones regulares disponibles en el mercado, las más utilizadas son las secciones circulares, cuadradas, rectangulares o tipo T, la disposición de las barras no requiere ninguna consideración especial y su costo es sumamente inferior al de una reja de efecto Coanda.

Por otra parte, a pesar de las ventajas hidrodinámicas y de filtración de las rejas de efecto Coanda, estas son estructuras patentadas cuya disponibilidad es limitada, en la mayoría de casos deben importarse y adquirirse bajo pedido, estas y otras limitantes condicionan a que los Municipios y diseñadores continúen utilizando diseños tipo de rejas convencionales que en ríos de montaña con alto contenido de sedimentos, permiten a través de sus aberturas el ingreso de grandes cantidades de sólidos, que luego deben ser removidos mediante costosas estructuras como desripiadores o desarenadores.

Para evaluar de forma experimental el funcionamiento hidráulico de la reja de efecto Coanda, se construyó un dispositivo de laboratorio junto con tres prototipos de reja, el primer prototipo se fabricó con barras de sección triangular o tipo cuña con características similares a las disponibles comercialmente, la sección triangular y el desfase angular se obtuvieron mediante mecanización de barras de sección cuadrada con equipo de torno de alta precisión, esto permitió evaluar el grado de complejidad y costo estimado de fabricación, así como la pertinencia de hacerlo de manera artesanal para proyectos reales, las dos rejas adicionales se elaboraron con barras de secciones semicircular y circular, la sección semicircular tuvo un procedimiento de mecanización similar al de sección triangular, la reja con barras de sección circular no necesitó ningún trabajo de mecanización. Desde el punto de vista constructivo y de coste, la reja de barras de sección circular presenta las mayores ventajas, las rejas de sección triangular y semicircular resultan complejas de elaborar y su coste es elevado en comparación a la reja de barras circulares.

4.2. Conclusiones respecto a la revisión del estado actual del conocimiento

La revisión del estado actual del conocimiento de las rejas de fondo, demuestra que la mayor cantidad de investigaciones ha sido enfocada a las rejas cuyas barras están dispuestas de forma paralela al flujo, a pesar de ello, no existe una metodología general para el dimensionamiento de dichas rejas.

A pesar del número de investigaciones que se han desarrollado en sistemas de captación de fondo, aún existe incertidumbre en el efecto que producen los sedimentos al pasar sobre la reja y la forma en la que se depositan sobre esta. Las recomendaciones que se encuentran en la literatura técnica se asocian a una configuración específica de reja de fondo, así como a experiencias en prototipos de captaciones.

En la literatura técnica se encuentran recomendaciones sobre evitar el uso de barras circulares debido a que se obstruyen más fácilmente [10], [16]; así como también, el caso contrario, en el que se asegura que los perfiles circulares o redondeados trabajan mejor en términos de capacidad de descarga y comportamiento ante la obstrucción [3], [48]. Para el presente estudio, estas recomendaciones se consideran relativas a dos factores relevantes que son: la disposición de las barras respecto al sentido del flujo y la pendiente de la reja. En el caso de barras de sección circular paralelas al flujo las ranuras longitudinales facilitan el enganche de sólidos entre las barras, las ranuras actúan como embudo para los sólidos durante su paso sobre la reja, en el caso de barras circulares transversales al flujo, los sólidos se desplazan sobre las superficies curvas de cada barra, con pendientes y velocidades altas, los sólidos fácilmente se desplazan sobre las crestas de las barras y la posibilidad de atascarse es mínima.

Estudios sobre rejas de fondo con barras transversales al flujo son limitados, sin embargo, algunas formulaciones propuestas para las tomas de fondo con barras transversales se derivan de las formulaciones de rejas de fondo con barras paralelas al flujo. La mayor cantidad de estudios de rejas con barras transversales al flujo han sido desarrollados para la denominada reja de efecto Coanda.

La referencia [50], es el único estudio hallado sobre rejas de barras de sección circular transversales al flujo, este estudio se realizó con agua limpia y la reja en posición

horizontal. No se ha encontrado información sobre rejas de fondo con barras de sección circular transversales al flujo con presencia de sedimentos.

4.3. Conclusiones respecto a la experimentación física

El dispositivo de laboratorio ha permitido evaluar el funcionamiento hidráulico de rejas de barras transversales al flujo bajo condiciones de agua limpia y de agua con sedimento. La pendiente ajustable del canal permitió modificar indirectamente la velocidad y profundidad del flujo sobre la reja.

En la etapa de experimentación física con agua limpia, se evaluó la influencia que tiene la pendiente longitudinal del canal y la forma de las barras sobre el flujo capturado. Tres prototipos de reja fueron evaluados, se utilizaron barras de 5mm de ancho con secciones de forma triangular, circular y semicircular.

La inclinación del canal más favorable para los tres prototipos de reja, es la de 35 grados, con un 44.4% del flujo total suministrado equivalente a un caudal de 1.11 L/s, la reja de barras de sección triangular es la más eficiente en cuanto a capacidad de captación. La eficiencia de esta reja se atribuye principalmente al efecto de corte producido por la disposición de las barras, este efecto se genera debido a que cada barra dispuesta perpendicularmente a la dirección del flujo está inclinada unos pocos grados aguas abajo sobre su eje de modo que los bordes delanteros forman una serie de desplazamientos de corte de agua que se proyectan en el flujo. En tal sentido mientras mayor sea la inclinación de las barras respecto a su eje, mayor será el efecto de corte y el caudal capturado. Generalmente se utilizan ángulos entre 3 y 5 grados, inclinaciones mayores pueden causar problemas de obstrucción y mayor captación de sedimentos.

En la práctica, dependiendo de la capacidad abrasiva de los materiales arrastrados por el río, la eficiencia de las rejas de efecto Coanda con barras de sección triangular puede verse afectada por el desgaste de los ángulos de ataque de las barras que producen el efecto de corte.

La reja con barras de sección semicircular ocupa el segundo lugar en cuanto a capacidad de captación de agua limpia, respecto al flujo total suministrado, con una inclinación de 35° la reja capta hasta un 36.8% que corresponde a 0.92 L/s. Las barras están dispuestas sin ninguna inclinación respecto a su eje.

La reja de barras de sección circular presenta la menor eficiencia en cuanto a captación de agua limpia, respecto al flujo total suministrado, con una inclinación de 35° la reja capta hasta un 21.6% que corresponde a 0.54 L/s. Las barras no necesitan ningún trabajo de mecanización, su fabricación es fácil.

En función de los resultados de laboratorio, en términos prácticos se puede concluir que la reja de barras circulares tiene una capacidad de captación de aproximadamente el 50% de la capacidad de la reja de barras de sección triangular, lo que significa que, para igualar la capacidad de captación se necesita duplicar las dimensiones de la reja de barras de sección circular. En base a la facilidad constructiva y disponibilidad comercial de las barras de sección circular, en términos técnicos y económicos duplicar las dimensiones no representa un inconveniente.

En la elaboración de los prototipos de reja se determinó que la de barras de sección triangular tiene un costo aproximado de 5 veces el costo de una de barras de sección circular. La diferencia de se debe al trabajo de mecanización que debe realizarse para lograr la sección triangular y el desfase angular necesario para producir el efecto de corte.

Todos los experimentos de laboratorio se realizaron con las rejas en la zona baja del canal, por cuestiones económicas no se realizaron modificaciones al montaje experimental. Para complementar esta información, se utilizó experimentación numérica con CFD. En este estudio se evaluaron las rejas en las posiciones media y alta del canal.

En la práctica, la captación de agua superficial sin presencia de sólidos o sedimentos no es un escenario común, por lo que, para definir la eficiencia real de una reja, lo más conveniente es evaluar su funcionamiento en condiciones similares a las que se dan en los sitios de captación, esto significa evaluar las rejas con agua y sedimento. Para esto se adaptó al dispositivo de laboratorio un embudo con una válvula que permitió agregar una cierta cantidad de sedimento por cada litro de agua.

Los ensayos de laboratorio con agua y sedimento se realizaron bajo las mismas condiciones de caudal, inclinación del canal y carga de sedimento, para los tres prototipos de reja ensayados en la experimentación con agua limpia. En un primer escenario se desarrolló las pruebas con tamaños de partículas separadas, clasificadas por diámetro según la serie de tamices inferiores a 2mm y el segundo escenario se desarrolló con partículas de sedimento mezcladas. Para el primer escenario, el mayor

porcentaje de sedimento excluido para cada tamaño de partícula lo presenta la reja de barras de sección circular. Tomando como referencia las partículas de menor diámetro (0.15mm-0.063mm) a 35° de inclinación, la reja de barras de sección circular excluye un 79.05% en comparación a la reja de barras de sección triangular que excluye un 57.46%.

Considerando todos los tamaños de partículas, el porcentaje promedio de exclusión de sedimento de la reja de barras circulares es el más alto, aproximadamente un 89%, sin embargo, este valor no representa por si solo la eficiencia de la reja, para ello es necesario considerar la relación entre el sedimento y el caudal de agua captado, mientras más bajo sea dicho valor, mayor es la eficiencia de la reja al trabajar con agua y sedimento.

En cuanto a exclusión de sedimento, la reja de barras de sección circular presenta la mayor eficiencia para todos los ángulos de inclinación, seguida de la barra de sección semicircular y con la menor eficiencia la barra de sección triangular. En todos los casos la mayor eficiencia se presenta con un ángulo de inclinación del canal de 35 grados.

El efecto de corte producido por el desfase angular de las barras de sección triangular, si bien es favorable en la captación de agua limpia, en las pruebas con agua y sedimento actúa como obstáculo y retiene partículas pequeñas de sedimento que son captadas junto con la lámina de agua que ingresa por cada ranura, la mayor cantidad de partículas retenidas está en el rango de 0.3mm hasta 0.063mm.

La ausencia de esquinas y bordes afilados en la superficie curva de las barras circulares hace que el efecto de corte sea nulo, no hay obstáculos para el paso del agua con sedimento, el flujo se desliza sobre la superficie de cada barra sin interferencias, lo que beneficia a la captación de agua con la menor cantidad de sólidos.

Considerando la facilidad constructiva y la eficiencia en exclusión de sedimentos presentada por la reja de barras de sección circular, se evalúa el efecto que tiene el diámetro de las barras, para esto se construyen dos rejas con diámetros de 3mm y 6.3mm. Los resultados demuestran que con un mayor diámetro se puede incrementar la capacidad de captación de agua, sin embargo, la mayor eficiencia en cuanto a exclusión de sedimento se logra con la barra de 3mm a una inclinación de 45 grados.

En base a lo expuesto en el párrafo anterior, el uso de rejas con barras de sección circular transversales al flujo tiene dos consideraciones importantes, si el objeto es

captar mayor cantidad de agua sin importar la cantidad de sedimentos, la mejor opción es utilizar diámetros grandes con números de Froude bajos, el segundo escenario y que probablemente es el más común e importante, es aquel en el que se requiere captar agua con la menor cantidad de sedimentos posible, para este caso es conveniente utilizar diámetros pequeños con números de Froude altos.

4.4. Conclusiones respecto a la experimentación numérica

La experimentación numérica 2D permitió obtener resultados cualitativos y cuantitativos altamente consistentes con los resultados de laboratorio. La precisión de ANSYS FLUENT se evaluó con agua limpia. La prueba de independencia de malla presentó resultados satisfactorios con elementos del tamaño de 0.04 mm en la zona de las barras de la reja.

Experimentos numéricos realizados con diferentes posiciones e inclinaciones muestran que las rejas con barras de sección triangular y circular tienen comportamientos opuestos. Las rejas con barras triangulares son más eficientes en términos de flujo capturado a medida que aumentan los números de Reynolds y Froude, mientras que las de barras circulares son más eficientes a medida que disminuyen Reynolds y Froude.

En general, utilizando barras de igual tamaño y separaciones (mismo Reynolds y Froude), las rejas con barras triangulares son más eficientes que las de barras circulares. Los experimentos numéricos con rejas de barras circulares han demostrado que aumentar el tamaño de las barras manteniendo la separación aumenta la eficiencia del flujo capturado a un nivel similar al de las rejas de barras triangulares. Es importante señalar que las rejas con barras circulares son más baratas y fáciles de construir y pueden ser una buena opción para la eliminación de sedimentos. En caso de que requerir una mayor eficiencia de flujo, es recomendable utilizar barras circulares con diámetros más grandes.

4.5. Futuros desarrollos

Como futuros desarrollos respecto a la presente investigación se prevé realizar las siguientes extensiones:

Continuar con el estudio experimental sobre el funcionamiento hidrodinámico de rejas de barras de sección circular transversales al flujo. La investigación desarrollada tiene limitantes en cuanto a rango de caudales, se ha utilizado un caudal constante de 2.5 L/s. Para futuros desarrollos se evaluará el funcionamiento hidrodinámico de las rejas con un rango de caudales más amplio, con valores inferiores y superiores a 2.5 L/s, tanto para la experimentación física como para la experimentación numérica.

En base a la metodología propuesta por Wahl para rejas de efecto Coanda con barras de sección triangular, plantear soluciones analíticas simplificadas que permitan desarrollar una metodología de cálculo para dimensionar rejas de fondo con barras de sección circular transversales al flujo.

Ampliar la experimentación física con agua y sedimento, evaluar el funcionamiento de las rejas en las zonas media y alta del canal. Los resultados de laboratorio se utilizarán para calibrar el modelo numérico con presencia de sedimentos.

Instalar un prototipo de campo para evaluar el funcionamiento de la reja en condiciones reales, esto permitirá tener un registro del rendimiento de la estructura en función del tiempo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. A. Mostkow, "A Theoretical Study of Bottom Type Water intake," *La Houille Blanche*, vol. No. 4, pp. 570–580, 1957.
- [2] A. M. Yanmaz, Applied Water Resources Engineering, 4th ed. 2013.
- [3] S. Brunella, W. H. Hager, and H.-E. Minor, "Hydraulics of Bottom Rack Intake," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 129, no. 1, pp. 2–10, 2002, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2003)129:1(2).
- [4] M. Righetti and S. Lanzoni, "Experimental Study of the Flow Field over Bottom Intake Racks," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 134, no. 1, pp. 15–22, 2007, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:1(15).
- [5] J. T. García, L. G. Castillo, J. M. Carrillo, and P. L. Haro, "Empirical, dimensional and inspectional analysis in the design of bottom intake racks," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 8, 2018, doi: 10.3390/w10081035.
- T. L. Wahl, C. C. Shupe, H. Dzafo, and E. Dzaferovic, "Surface Tension Effects on Discharge Capacity of Coanda-Effect Screens," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 147, no. 8, p. 04021026, 2021, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001902.
- [7] H. E. Finch and J. J. Strong, "Self-cleaning screen," U.S. Patent No. 4,415,462, 1983.
- [8] J. J. Strong and R. F. Ott, "Intake screens for small hydro plants.," *Hydro Rev.*, vol. VII, no. V, 1988.
- [9] K. Subramanya, FLOW IN OPEN CHANNELS Third Edition. 2001.
- [10] J. Orth, E. Chardonnet, and G. Meynardi, "Étude de grilles pour prises d'eau du type 'en-dessous," *Houille Blanche*, vol. 3, pp. 343–351, 1954.
- [11] B. M., "Discharge Passing through a Bottom Grid," *La Houille Blanche*, vol. No.2, pp. 290–291, 1953.
- [12] J. Frank, V. Obering, and Erlangen, "Hydraulische Untersuchungen f
 ür das Tiroler Wehr," *Der Bauingenieur*, vol. 31, no. 3, pp. 96–101, 1956.
- [13] G. De Marchi, "Profili longitudinali della superficie libera delle correnti permanenti lineari con portata progressivamente crescente o progressivamente decrescente entro canali di sezione costante," *Ric. Sci. e Ricostr.*, pp. 203–208, 1947.

- [14] G. Noseda, "Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo," *L' Energ. Elettr.*, vol. b, pp. 41–51, 1956.
- [15] D. G., "Notes sur le calcul hydraulique des grilles par-dessous," *Houille Blanche*, vol. 1, pp. 59–65, 1963.
- [16] S. Krochin, *Diseño Hidráulico*, 2da ed. Quito-Ecuador, 1978.
- [17] F. Garot, "De Watervang met liggend rooster," *Ing. Ned. Indie*, vol. 6, no. 7, pp. 115–132, 1939.
- [18] J. Frank, "Fortschritte in der hydraulic des Sohlenrechens," *Der Bauingenieur*, vol. 34, pp. 12–18, 1959.
- [19] H. Nakagawa, "On Hydraulic performance of bottom diversión Works," 1969.
- [20] Z. Ahmad and M. Mittal, "Recent advances in the design of trench weir," *Himal. small hydropower summit, Dehradun, India*, pp. 72–84, 2006, [Online]. Available: http://ahec.org.in/acads/HSHS/Presentations/Links/Technical Papers/Case Studies/Dr Z Ahmad_Recent Advances in the Design of Trench Weir.pdf.
- [21] L. G. Castillo, J. T. García, and J. M. Carrillo, "Experimental and numerical study of bottom rack occlusion by flow with gravel-sized sediment. Application to ephemeral streams in semi-arid regions," *Water (Switzerland)*, vol. 8, no. 4, 2016, doi: 10.3390/w8040166.
- [22] O. Kirschmer, "Untersuchungen über den Gefällsverlust an Rechen," *Mitteilungen des Hydraul. Instituts der TH München*, vol. 1, 1926.
- [23] G. Noseda, "Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo.," *Ric. Sper. L' Energ. Elettr.*, pp. 565–581, 1956.
- [24] C. A. . White, J.K., Charlton, J.A., and Ramsay, "On the design of bottom intakes for diverting stream flows," *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. 51, 1972.
- [25] V. Te Chow, Open-Channel Hydraulics. New York, 1959.
- [26] H. Drobir, "Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge," Österreichische Wasserwirtschaft, vol. 11, no. 12, pp. 243–253, 1981.
- [27] M. Righetti, R. Rigon, and S. Lanzoni, "Indagine sperimentale del deflusso attraverso una griglia di fondo a barre longitudinali.," in XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 2000, pp. 112–119.
- [28] N. Drobir H., Kienberger, V. and Krouzecky, "The wetted rack length of the Tyrolean weir," 1999.
- [29] M. Kuntzmann, J. and Bouvard, "Theoretical Study of Bottom Type Water /make Grids," *La Houille Blanche*, vol. No. 3, pp. 569–574.
- [30] C. Fawer, "Étude de quelques ecóulements permanents a filets curves," La Concorde, Lausane Switzerland, 1937.
- [31] F. Serre, "Contribution à l'étude des écoulements permanents et variables dans

les canaux," La Houille Blanche, vol. 3, pp. 374–388, 1963.

- [32] K. Hager, W. H., Hutter, "Approximate Treatment of Plane Channel Flow," *Acta Mech.*, vol. 51, pp. 31–48, 1984.
- [33] W. H. H. Castro-Orgaz, O., "Spatially-varied open channel flow equations with vertical inertia," *J. Hydraul. Res.*, vol. 49, no. 5, pp. 667–675, 2011.
- [34] S. G. Melik-Nubarow, "Type perfectionnè de prise d'eau à grille horizontale," *Revue*, vol. 10, no. 11, 1939.
- [35] F. W. . Zamarin, E.A., Popow, K.W., *Wasserbau*, 3rd ed. 1956.
- [36] Khatchatrian, "Analyse de prise d'eau de montagne à grille du type en dessous," Erévan, 1955.
- [37] P. Venkataraman, "Discharge Characteristics of an Idealised Bottom Intake," *J. Inst. Civ. Eng.*, vol. 58, pp. 99–104, 1977.
- [38] A. S. Nasser, M. S., Venkataraman, P. y Ramamurthy, "Flow in a channel with a slot in the bed," *J. Hydraul. Res.*, vol. 18, no. 4, pp. 359–367, 1980.
- [39] M. Ramamurthy, A. and Satish, "Discharge Characteristics of Flow Past a Floor Slot," J. Irrig. Drain Eng., vol. 112, no. 1, pp. 20–27, 1986.
- [40] J. Ract-Madoux, M., Bouvard, M., Molbert, J., and Zumstein, "Quelques réalisations récentes de prises en-dessous à haute altitude en Savoie," *La Houille Blanche*, vol. 6, pp. 852–878, 1955.
- [41] H. Simmler, "Konstruktiver Wasserbau, Technische Universität Graz, Institut f
 ür Wasserwirtschaft und konstruktiven Wasserbau.," 1978.
- [42] A. J. Raudkivi, *Hydraulic structures design manual.* 1993.
- [43] M. Castro, "Sobre la Captación de Agua desde Cauces Fluviales," *Politécnica,* vol. XI, no. 1, pp. 7–34, 1986.
- [44] G. Lauterjung, H., & Schmidt, "Planning of intake structures: A publication of Deutsches Zentrum f
 ür Entwicklungstechnologien - GATE," Dtsch. Gesellschaft f
 ür Tech. Zusammenarbeit <GTZ> GmbH. Braunschweig Vieweg., 1989.
- [45] V. Vargas, "Tomas de fondo. XVIII," 1988.
- [46] O. and Jiménez and O. Vargas, "International Symposium on Hydraulic Structures Ciudad Guayana, Venezuela, October 2006 Some Experiences in the Performance of Bottom Intakes," no. OCTOBER, 2006.
- [47] A. Andaroodi, M., & Schleiss, "Standardization of civil engineering works of small high-head hydropower plants and development of an optimization tool, LCH N°26: Communication," 2006.
- [48] J. T. García, "Estudio experimental y numérico de los sistemas de captación de fondo," Universidad Politécnica de Cartagena, 2016.
- [49] K. G. Ranga Raju, G. L. Asawa, and R. Seetharamaiah, "Analysis of Flow through

Bottom Racks in Open Channels," in 61h Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Adelaide, Australia, 1977, pp. 237–240.

- [50] D. Subramanya, K. and Sengupta, "Flow through Bottom Racks," Indian J. Technol., vol. 19 No. 2, pp. 64–67, 1981.
- [51] K. Subramanya, "Trench Weir Intake for Mini Hydro Projects," *Lise Bangalore*, pp. 33–41, 1990.
- [52] K. Subramanya, "Hydraulic Characteristics of Inclined Bottom Racks," UOR Roorkee, pp. 3–9, 1994.
- [53] S. K. Subramanya, Kanakatti, & Shukla, "Discharge diversion characteristics of trench weirs," *J. Civ. Engg. Div*, vol. 69, pp. 163–168, 1988.
- [54] M. J. Mur Abad, "Estudio de la influencia de la geometría sobre la capacidad de captación de una reja / imbornal," Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.
- [55] M. Gómez, H. Sánchez, P. Malgrat, F. Castillo, D. Sunyer, and L. Nanía, "Inlet Spacing Considering the Risk Associated to Runoff. Application to Streets and Critical Points of the City of Barcelona M.," 2002, doi: https://doi.org/10.1061/40644(2002)276.
- [56] M. Gómez and B. Russo, "Eficiencia hidráulica de rejillas transversales continuas," *Jornadas Ing. del Agua*, 2009.
- [57] B. Russo, M. G. Valentín, and J. Tellez-álvarez, "The relevance of grated inlets within surface drainage systems in the field of urban flood resilience. A review of several experimental and numerical simulation approaches," *Sustain.*, vol. 13, no. 13, 2021, doi: 10.3390/su13137189.
- [58] C. S. P. Ojha, V. Shankar, and N. S. Chauhan, "Analysis of flow over horizontal transverse bottom racks," *ISH J. Hydraul. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 41–52, 2007, doi: 10.1080/09715010.2007.10514870.
- [59] F. J. Fontein, "Some Variables Influencing Sieve-Bend Performance," in *Int. Chemical Engineers Joint Meeting*, 1965.
- [60] T. L. Wahl, "HYDRAULIC PERFORMANCE OF COANDA-EFFECT SCREENS," J. Hydraul. Eng. /, no. June, pp. 72–75, 2001.
- [61] G. H. Stine, "The Rises and Falls of Henri-Marie Coanda," *Air Space*, 1989.
- [62] T. L. Wahl, "Design Guidance for Coanda-Effect Screens," Water Resour. Res., no. July, 2003.
- [63] T. L. Wahl, "New Testing of Coanda-Effect Screen Capacities," in *HydroVision* International, 2013.
- [64] T. L. Wahl, "Hydraulic Testing of Static Self-Cleaning Inclined Screens," 1995.
- [65] T. L. Wahl and R. F. Einhellig, "Laboratory Testing and Numerical Modeling of Coanda-Effect Screens," *Build. Partnerships*, no. 1, pp. 1–10, 2000, doi:

10.1061/40517(2000)72.

- [66] S. Esmond, "Effectiveness of Coanda Screens for Removal of Sediment, Nutrients, and Metals from Urban Runoff," in *43rd International Erosion Control Association Annual Conference*, 2012, pp. 96–107.
- [67] D. May, "Sediment Exclusion From Water Systems Using a Coanda Effect Device," Int. J. Hydraul. Eng., vol. 4, no. 2, pp. 23–30, 2015, doi: 10.5923/j.ijhe.20150402.01.
- [68] T. L. Wahl, "Improving Coanda-Effect Screen Technology," Denver, 2017.
- [69] J. M. Carrillo, J. T. García, and L. G. Castillo, "Experimental and numerical modelling of bottom intake racks with circular bars," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 5, pp. 1–20, 2018, doi: 10.3390/w10050605.
- [70] L. G. Castillo and J. M. Carrillo, "NUMERICAL SIMULATION AND VALIDATION OF INTAKE SYSTEMS WITH CFD METHODOLOGY," in 2nd IAHR Europe Congress, 2012, no. December, pp. 942–945.
- [71] L. Castillo, J. Carrillo, and J. García, "Comparison of clear water flow and sediment flow through bottom racks using some lab measurements and CFD methodology," *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 172, pp. 227–237, 2013, doi: 10.2495/RBM130191.
- [72] L. G. Castillo, J. M. Carrillo, and J. T. García, "Flow and Sediment Transport Through Bottom Racks . CFD Application and Verification with Experimental Measurements.," *Proc. 2013 IAHR Congr.*, no. 2008, pp. 1–10, 2013.
- [73] K. Hosseini, S. Rikhtegar, H. Karami, and K. Bina, "Application of Numerical Modeling to Assess Geometry Effect of Racks on Performance of Bottom Intakes," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 40, no. 3, pp. 677–684, 2015, doi: 10.1007/s13369-014-1542-4.
- [74] K. Wong, "Hydraulics of bottom rack chamber for supercritical flow diversion," 2009.
- [75] Y. T. Zerihun, "Numerical simulation of flow in open channels with bottom intake racks," pp. 49–61, 2015.
- S.-M. Yun, Y.-S. Kim, H.-J. Shin, and S.-C. Ko, "A Numerical Study for Optimum Design of Dust Separator Screen Based on Coanda Effect," *Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, vol. 17, no. 6, pp. 177–185, 2018, doi: 10.14775/ksmpe.2018.17.6.177.
- [77] C. Chanson, H.; Gualtieri, "Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps.," *J. Hydraul.*, vol. 46, pp. 35–44, 2008.
- [78] F. A. Bombardelli, "Computational multi-phase fluid dynamics to address flows past hydraulic structures.," in *Proceedings of the 4th IAHR International*

Symposium on Hydraulic Structures, 2012.

- [79] C. Blocken, B.; Gualtieri, "Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics.," *J. Environ. Model. Softw.*, vol. 33, pp. 1–22, 2012.
- [80] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Second edi., vol. 6, no. 4. 2007.
- [81] K. Chandler, D. Gill, B. Maher, S. Macnish, and G. Roads, "Coping with probable maximum flow an alliance project delivery for Wivenhoe Dam," 2003.
- [82] C. Hirsch, "Numerical Computation of Internal and External Flows," *Fundam. Comput. Fluid Dyn.*, vol. I, 2007.
- [83] Ansys Inc., "ANSYS FLUENT Theory Guide," ANSYS Inc., USA, vol. Release 20, no. R1, p. 814, 2020, [Online]. Available: http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm.
- [84] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA J 32*, pp. 1598–1605, 1994.
- [85] B. N. C.W. Hirt, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries," J. Comput. Phys., vol. 39(1), pp. 201–225, 1981.