

Experimentación numérica de rejillas de fondo con barras de sección circular transversales al flujo.

Daniel Alejandro Carrión Coronel E-MAIL: dacarrion3@gmail.com

Pontificia Universidad Católica del Ecuador, PUCEM. Ecuador

Eric Cabrera Estupiñán E-MAIL: eric.cabrera@uleam.edu.ec

Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí ULEAM, facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura. Ecuador

Eduardo Fernando Carrión E-MAIL: efcarrion@utpl.edu.ec
Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), facultad de Ingenierías y Arquitectura. Ecuador

RESUMEN

Este estudio presenta los resultados de una experimentación numérica de rejillas de fondo con barras circulares transversales al flujo. Las geometrías, los mallados y las condiciones de cálculo se basaron en modelos previamente calibrados de alta precisión. Las simulaciones se realizaron utilizando el código CFD ANSYS 2020 R1 para caudales de entrada al sistema $Q = 2,0, 2,5$ y $3,0$ l/s, ubicando la rejilla en la zona alta del canal. Se utilizó un diámetro de barra de 3 mm, y se evaluaron diferentes ángulos de inclinación de las rejillas $\theta = 20^\circ, 35^\circ$ y 45° , con separaciones entre barras $h = 1$ y 2 mm. Las simulaciones iniciales del flujo sin rejillas proporcionaron las condiciones de entrada para los prototipos de rejilla propuestos. De las simulaciones se pudo obtener los campos de velocidad del flujo, presión y caudal captado por cada ranura. Se demuestra que para $Q = 2,5$ l/s y $\theta = 35^\circ$ se obtienen los mayores caudales captados y eficiencia de captación, también que con el incremento de espaciamiento entre barras aumenta el caudal captado hasta un 42,59%.

PALABRAS CLAVES:

barras circulares, ANSYS, Froude, efecto coanda, rejillas transversales.

Numerical experimentation of bottom screens with circular bars transverse to the flow.

ABSTRACT

This study presents the results of numerical experimentation of bottom screens with circular bars transverse to the flow. The geometries, meshes and calculation conditions were based on previously calibrated high-precision models. The simulations were performed using the CFD code ANSYS 2020 R1 for inlet flows to the system $Q = 2,0, 2,5$ and 3.0 l/s, locating the screen in the upper zone of the channel. A bar diameter of 3 mm was used, and different angles of inclination of the screens $\theta = 20^\circ, 35^\circ$ and 45° were evaluated, with separations between bars $h = 1$ and 2 mm. The initial simulations of the flow without screens provided the inlet conditions for the proposed screen prototypes. From the simulations, the flow velocity, pressure and flow fields captured by each slot could be obtained. It is shown that for $Q = 2,5$ l/s and $\theta = 35^\circ$ the highest captured flow rates and capture efficiency are obtained, also that with the increase in spacing between bars the captured flow rate increases up to 42,59%.

KEYWORDS: circular bars, ANSYS, Froude, coanda effect, transverse screens.

01 INTRODUCCIÓN

Las captaciones de agua en ríos de alta montaña frecuentemente se realizan mediante rejass ubicadas en el lecho del cauce para permitir el paso del agua. Sin embargo, estas estructuras enfrentan problemas debido al arrastre de sedimentos, lo cual puede obstruir las rejass y afectar el suministro de agua. Ante los inconvenientes con las rejass tradicionales, como las de barras longitudinales y transversales, en los últimos años se ha popularizado el uso de rejass de efecto Coanda, construidas con alambres en forma de cuña, que producen un efecto autolimpiante, reduciendo los costos de mantenimiento e inversión, lo que lo hace un tema de mucha actualidad en el campo investigativo donde suele aplicarse una combinación de modelos físicos y numéricos para el análisis de su funcionamiento, ver Carrillo, J. A. (2024) y Dzafo et al. (2021). No obstante, en Ecuador no ha habido mucho trabajo investigativo en estas rejass de efecto Coanda, caben resaltar los trabajos de Carrión (2019) y Carrión (2020). De igual manera, es importante decir que en el país el empleo de estas rejass en obras hidráulicas es limitado, ya que, al ser estructuras patentadas, sus costos de importación son elevados.

Con el objetivo de ofrecer soluciones para comunidades rurales de menos de 1000 habitantes en Ecuador, Carrión (2019) evaluó diferentes tipos de rejass construidas bajo distintas formas de barras (triangular, circular y semicircular) elaboradas a partir de materiales locales, encontrando que la reja construida con barras circulares es la más eficiente en términos de captura de sedimentos, además de ser más económica y fácil de fabricar. En vista de la facilidad de construcción de la rejilla de barra de sección circular y de su eficacia para excluir sedimentos, Carrión (2019) evaluó el impacto del tamaño de la barra y construyó 2 rejillas con tamaños de 3 mm y 6,3 mm. Los resultados de su estudio demostraron que la barra de 3 mm tenía la mejor eficacia para la exclusión de sedimentos.

Debido a la falta de información sobre el comportamiento hidráulico de estas rejass circulares, Carrión (2020) realizó un análisis detallado utilizando el software ANSYS y un modelo numérico calibrado a partir de las pruebas físicas previas, alcanzando una precisión del 91,56%. En estudios posteriores (Carrión, 2022), se evaluaron factores geométricos como la inclinación, la ubicación en el canal y la configuración de las barras, concluyendo que la ubicación en la parte superior del canal mejora la eficiencia de la reja.

Este trabajo amplía las investigaciones previas, realizando simulaciones numéricas con diferentes caudales, ubicando la reja en la zona alta del canal, utilizando un diámetro de barra de 3 mm. Los objetivos específicos incluyen la simulación del flujo en un canal sin rejass, la interpolación de resultados para obtener variables de entrada para el análisis hidrodinámico y la realización de un estudio paramétrico CFD-2D que evalúe el impacto de factores clave como la inclinación del canal, la separación entre barras y el caudal de entrada.

02 DESARROLLO

Para esta investigación se emplea el modelo físico de Carrión (2019) a partir del cual se crea un modelo matemático que será detallado más adelante, ver la figura 1.

Este canal tiene una sección transversal rectangular con un ancho de plato de 9,3 cm, una longitud es de 2 m y con las posibilidades de ajustar su inclinación con respecto a la horizontal entre los ángulos 20° y 45°. El sistema experimental integra un depósito de almacenamiento y un sistema de bombeo, diseñados para garantizar la recirculación del fluido. El agua se impulsa hacia un tanque superior dotado de un vertedero, desde donde se dirige al canal. Al traspasar la reja, una porción del líquido es interceptada por la pantalla, mientras que el remanente se dirige hacia el reservorio de

almacenamiento. El caudal que se filtra a través de la pantalla se canaliza hacia un recipiente auxiliar para su posterior cuantificación.

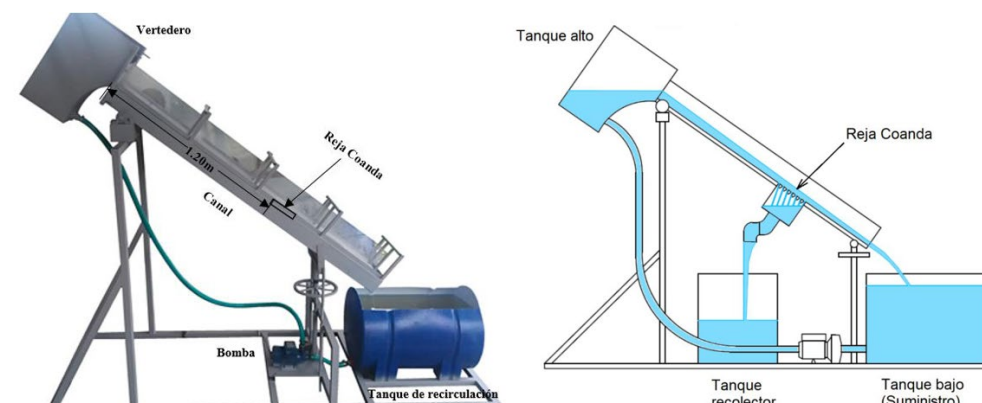


Figura 1. Imagen izquierda: Modelo físico de laboratorio. Imagen derecha: Esquema operativo (en funcionamiento con agua limpia), del modelo físico.

Para el presente trabajo, se adoptaron geometrías, mallados, condiciones de cálculo y métodos de resolución numérica del modelo numérico propuesto por Carrión (2020), utilizando el software de simulación numérica CFD ANSYS 2020 R1, ver Stefano et al. (2021) que combina en una única plataforma las etapas de pre-proceso, método de solución y post-proceso.

Con el fin de generar el dominio fluido en el cual acontecen las simulaciones, se generaron geometrías 2D, empleando técnicas de diseño asistido por computadora, modelando las geometrías del canal y los prototipos de reja (diámetro de barra 3 mm, separaciones de 1 mm y 2 mm).

Las variables tomadas en cuenta para la creación de geometrías 2D a emplearse en las simulaciones numéricas se exhiben en la tabla 1.

Tabla 1. Configuración geométrica de rejas compuestas por barras de sección circular.

Variable	Valor	Observaciones
Inclinación θ (°)	20, 35, 45	Canales con régimen supercrítico.
Diámetro (mm)	3	
Espaciamiento entre barras h(mm)	1, 2	
Ubicación con respecto al canal	Alta	

Se realizó el diseño de las geometrías y la discretización del dominio fluido según las técnicas de Carrión (2020), logrando una representación precisa de las rejas y del flujo en el canal. Se utilizaron mallas estructuradas para el canal y el vertedero, y mallas mixtas para las rejas con barras circulares. Este enfoque permitió integrar de manera efectiva las distintas secciones del dominio, asegurando resultados precisos en las simulaciones.

Se establecieron las condiciones límite necesarias para el modelo, tales como la entrada, salida, apertura, pared y plano simétrico, además de definir las propiedades físicas de los fluidos (aire y agua). Estas condiciones fueron claves para modelar adecuadamente el comportamiento del flujo. Se establecieron parámetros como la densidad y la viscosidad dinámica, esenciales para obtener resultados fiables y representativos del comportamiento del flujo a través de las rejas.

Se realizaron simulaciones iniciales en el canal sin rejas, estableciendo condiciones de entrada para simulaciones posteriores. Los resultados obtenidos, como el caudal másico y el tirante crítico, permitieron definir condiciones iniciales precisas en los modelos numéricos de los prototipos de reja. El monitoreo de la convergencia con ANSYS Fluent garantizó la estabilidad de las soluciones,

alcanzando una convergencia con un residuo máximo de $RES=10^{-6}$, lo que aseguró la fiabilidad de los resultados.

Se utilizó el software ANSYS FLUENT 2020 R1 para realizar las simulaciones hidrodinámicas de las rejatas de fondo con barras transversales al flujo. El método de volumen finito permitió resolver las ecuaciones gobernantes de manera precisa, detallando el flujo en cada barra y ranura. La selección del modelo de turbulencia $k-\omega$ SST y el método VOF para el tratamiento de la superficie libre del agua resultaron adecuados, simulando de forma realista los efectos del flujo.

En la tabla 2, se detallan los esquemas numéricos adoptados para las simulaciones.

Tabla 2. Esquemas Numéricos y Métodos de Solución Utilizados

Variable	Esquema/Modelo
Turbulencia	$k-\omega$ SST
Acoplamiento Presión-Velocidad	Acoplado
Gradiente	Basado en Celdas de Mínimos Cuadrados
Presión	Ponderación de Fuerza Corporal
Momento	Segundo Orden Upwind
Fracción de Volumen	Compresivo
Energía Cinética de la Turbulencia	Segundo Orden Upwind
Tasa de Disipación de la Turbulencia	Segundo Orden Upwind
Inicialización	Estándar

02 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó el análisis paramétrico CFD bidimensional con el fin de evaluar el impacto de factores clave como la inclinación del canal, separación entre barras y caudal de ingreso, los que son difíciles de cuantificar por medio de experimentación física, pudiéndose obtener valores de caudal captado por orificio, velocidad y presión en cada hendidura de la rejilla.

Se evaluaron todas las configuraciones de rejatas definidas en la tabla 1, para caudales de ingreso de $Q=2,0$ l/s, $2,5$ l/s y $3,0$ l/s, empleando tres ángulos de inclinación del canal con la horizontal: $\theta=20^\circ$, 35° y 45° . Previo al análisis paramétrico CFD bidimensional, se realizaron simulaciones en el canal sin presencia de rejatas, cuyos resultados fueron interpolados a través de planos ortogonales en la zona superior del canal. Por medio de esta técnica se pudo extraer información sobre parámetros como; velocidad, presión y fracción de fase líquida. Dicha información se empleó como parámetros de entrada para la modelización del caudal sobre los prototipos de rejata.

En la figura 2, se exhiben los resultados de las simulaciones CFD correspondientes a una rejata de barras con un diámetro de 3 mm y ranuras de 2 mm, analizada bajo un ángulo de inclinación con la horizontal de $\theta=20^\circ$.

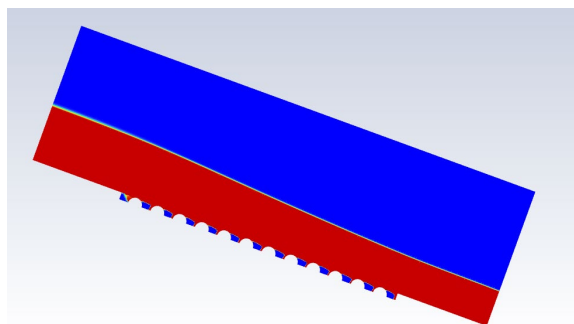


Figura 2. Resultados CFD rejata de barras de sección circular, caudal de ingreso $Q=2$ l/s; diámetro de barras 3mm; separación $h=2$ mm; ángulo de inclinación $\theta=20^\circ$.

Los resultados de simulaciones CFD muestran que las velocidades del flujo varían de 0 m/s a aproximadamente 2,42 m/s en los contornos de las barras, ver la figura 3, con las mayores velocidades observadas sobre las barras y las menores velocidades justo entre las barras. En los resultados detallados mediante contornos de presión, ver figura 4, se puede notar que, para todos los casos existentes, se producen altas presiones en el rango 1930 Pa a 2250 Pa en la parte superior izquierda de cada barra, justo donde la velocidad es menor, observándose posteriormente a pocos milímetros bajo la dirección del flujo, un cambio brusco hacia presiones negativas con valores en el rango -824 Pa a -1080 Pa, justo en la zona con mayores velocidades, resultados coherente con la ecuación de Bernoulli.

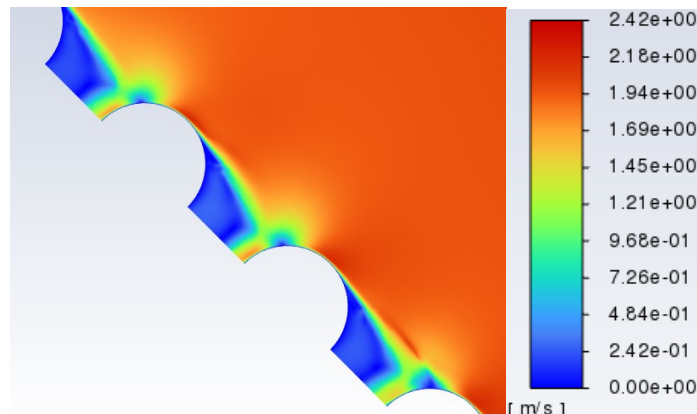


Figura 3. Distribución de velocidades (m/s). Resultados CFD reja de barras de sección circular, caudal de ingreso $Q= 3$ l/s; diámetro de barras 3mm; separación $h= 2$ mm; ángulo de inclinación $\theta=45^\circ$.

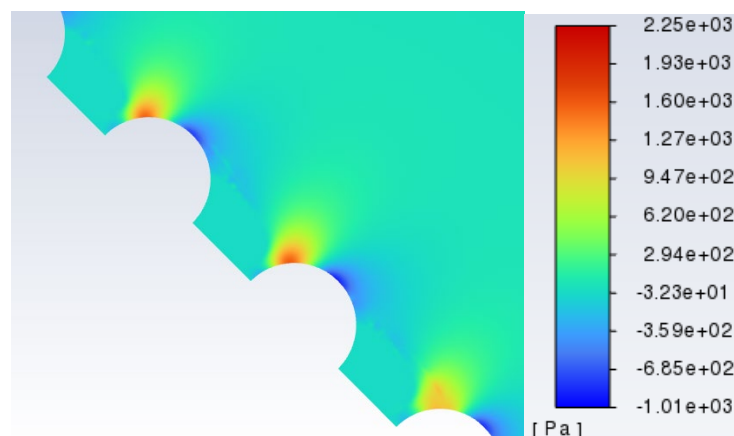


Figura 4. Distribución de presión (Pa). Resultados CFD reja de barras de sección circular, caudal de ingreso $Q= 3$ l/s; diámetro de barras 3mm; separación $h= 2$ mm; ángulo de inclinación $\theta=45^\circ$.

Uno de los resultados más importantes de las simulaciones CDF realizadas es la distribución de caudales captados entre barras del modelo q_i (l/s) donde $i=1, 2, 2 \dots, 13$. En tal sentido, en la tabla 3 y figura 5 se pueden observar los caudales individuales recolectados por las 13 ranuras entre las barras de sección circular con un diámetro de 3 mm y separaciones entre barras $h= 1,0$ y $2,0$ mm para los tres ángulos de inclinación $\vartheta= 20^\circ, 35^\circ$ y 45° grados y los tres caudales de entrada $Q = 2,0, 2,5$ y $3,0$ l/s.

Tabla 3. Valores de caudales q_{i-10-2} (l/s) captados por cada separación entre barras de sección circular, para los diferentes Q (l/s), θ (°) y h (mm).

Q	θ (°)	h	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10	q11	q12	q13
2,0	20	1,0	0	1,28	3,52	3,89	4,00	4,10	4,05	3,95	4,02	3,85	4,18	3,75	6,14
2,0	35	1,0	0	4,15	2,68	3,69	3,46	3,49	3,45	3,49	3,09	3,33	3,04	3,15	5,16
2,0	45	1,0	0	4,45	3,10	3,79	3,56	3,27	3,32	3,05	3,00	2,90	3,21	3,04	5,15
2,0	20	2,0	0	3,32	4,24	4,66	4,70	4,89	4,54	4,46	4,23	4,11	4,02	4,08	6,76
2,0	35	2,0	0	1,47	3,62	4,48	4,62	4,59	4,33	4,22	3,95	4,12	3,98	4,20	6,83
2,0	45	2,0	0	1,96	3,57	4,20	4,14	4,38	3,40	4,05	3,77	3,32	3,29	3,78	6,38
2,5	20	1,0	0	2,23	3,80	4,18	4,2	5,36	4,50	4,42	4,49	4,30	4,46	4,65	7,32
2,5	35	1,0	0	0,85	2,84	4,98	3,73	4,01	4,19	3,85	3,96	4,42	3,94	4,08	6,70
2,5	45	1,0	0	3,87	2,10	3,34	4,41	3,60	3,52	4,42	4,31	3,42	4,34	4,37	6,12
2,5	30	2,0	0	3,30	4,67	5,22	5,22	5,51	5,56	5,34	5,26	5,16	5,10	5,07	8,30
2,5	35	2,0	0	2,94	4,49	5,46	5,69	5,60	5,91	5,78	5,32	5,43	5,30	5,80	9,85
2,5	45	2,0	0	3,26	4,27	4,40	4,79	4,93	4,95	4,91	4,97	4,96	5,01	4,90	8,37
3,0	20	1,0	0	2,28	3,55	4,72	4,09	4,22	4,35	4,40	4,94	4,34	4,44	5,34	7,48
3,0	35	1,0	0	1,45	3,25	3,59	3,73	4,32	3,93	4,06	3,74	3,93	3,74	4,02	6,45
3,0	45	1,0	0	4,05	2,58	3,84	3,53	3,60	3,61	3,61	3,56	3,61	3,60	3,79	6,31
3,0	20	2,0	0	3,38	4,35	4,86	5,10	5,41	5,29	5,27	5,21	5,15	5,13	5,35	8,53
3,0	35	2,0	0	3,47	3,97	4,23	4,74	5,21	4,68	4,91	4,79	4,97	4,88	5,17	8,68
3,0	45	2,0	0	1,56	2,39	4,64	4,88	4,84	4,44	4,66	4,37	4,05	4,23	4,60	7,61

Véase en la figura 5 cómo en la primera abertura de todos los casos prácticamente no se capta caudal $q_1 \approx 0$, mientras que comienza a experimentarse un aumento gradual de los caudales obtenidos en las aberturas 2, 3 y 4, véase como a partir de la abertura 4 tiende a haber una homogenización de los caudales captados hasta la 12, mientras que en la última abertura incrementa de forma significativa el caudal en todos los experimentos.

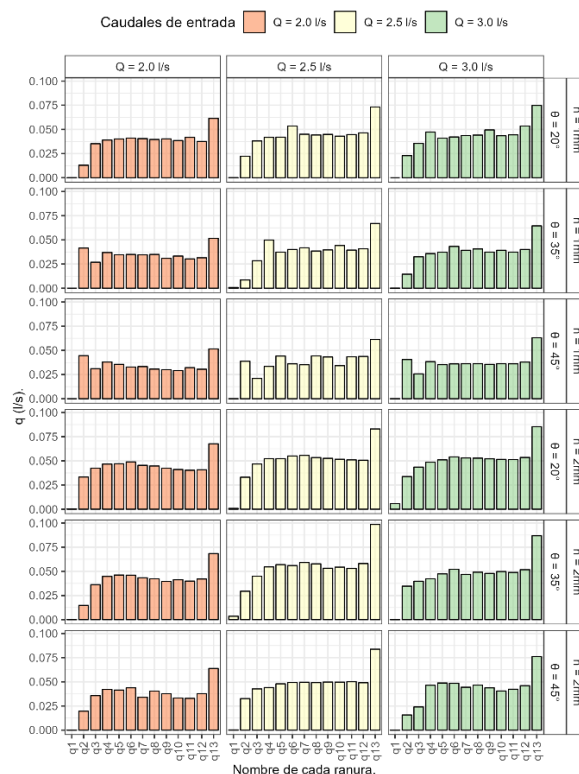


Figura 5. Tendencia Valores de caudales q (l/s) captados por cada separación entre barras de sección circular, para los diferentes Q (l/s), θ (°) y h (mm)

Otro análisis importante que se puede realizar con estos resultados es evaluar para cada caudal de entrada Q (l/s) y cada separación entre barras h (m) cómo se comportan los caudales captados en cada una de las 13 aberturas para cada ángulo de inclinación de las rejas. Con este propósito se realizan las gráficas de la figura 6, en donde, las abscisas de los 6 paneles corresponden a los valores de los caudales q_i (l/s) para cuando el ángulo de inclinación de las rejas es 20° , mientras que en los valores de las ordenadas se ubican los q_i (l/s) para cada uno de los ángulos de inclinación de las rejas, es decir $\vartheta = 20^\circ$, 35° y 45° , estos son entonces gráficos adimensionales en los que sobre la línea de 45° se ubican (con color verde) los q_i (l/s) para $\vartheta = 20^\circ$ y véase cómo en la gran mayoría de los casos los valores de q_i (l/s) para $\vartheta = 35^\circ$ (color naranja) se encuentran por debajo de la línea de 45° y más debajo aún se encuentran los valores de q_i (l/s) para $\vartheta = 45^\circ$ (color violeta), lo que indica un decrecimiento en los caudales captados por las separaciones entre barras a medida que aumenta el ángulo de inclinación de las rejas, este comportamiento pudiera explicarse debido a que al aumentar el ángulo de inclinación de las rejas, aumenta la velocidad de circulación del fluido, así como el número de Froude y disminuye en consecuencia el tirante hidráulico sobre las rejas, provocando esta disminución de carga y una consecuente disminución del caudal captado por cada separación entre barras, y esto ocurre así para prácticamente todos los casos, sin embargo en el caso de $Q = 2,5$ l/s, $h = 2$ mm y $\vartheta = 35^\circ$ los caudales captados por prácticamente todas las aberturas se encuentran por encima de la línea de 45° del gráfico, lo que indica que para esas condiciones el caudal captado $\Delta q = 0,6793$ l/s es el máximo de todos los experimentos realizados y se obtiene para un ángulo de inclinación de $\vartheta = 35^\circ$. Para este caso también se obtiene la mayor eficiencia de captación $E_{fc} = 27,17\%$, ver tabla 4; el concepto de eficiencia de captación se presenta seguidamente. Finalmente, este resultado de obtener el mayor caudal de captación de las rejas con el ángulo $\vartheta = 35^\circ$ coincide con el obtenido por Carrión (2022) en un experimento físico, pero en ese caso con barras de 5 mm de diámetro y con sección transversal de las barras de tipo triangular, circular y semicircular. Esto indica que en la estimación del caudal captado por las rejas con efecto Coanda son muy importantes el caudal de entrada a las rejas, las formas de las barras, sus diámetros y separaciones y la inclinación de dichas barras, pudiéndose obtener ángulos de inclinación óptimos (en cuanto a la captación de agua) para caudales de entrada determinados.

Otro de los indicadores importantes que se analizan en este estudio es la llamada eficiencia de captación E_{fc} (%) que no es más que la razón entre el caudal total que se logra captar en cada reja (para cada escenario) denotado como Δq (l/s) (que es la sumatoria de todos los 13 valores de q_i) y el caudal de entrada al sistema denotado por Q (l/s) luego: $E_{fc}(\%) = \Delta q/Q$.

La tabla 4 puede entenderse como una extensión de la tabla 3, donde como se dijo, Δq (l/s) en cada fila es sumatoria de todos los 13 valores de q_i , o lo que es lo mismo, el caudal total captado por la reja en sus 13 aberturas, V_1 (m/s) y V_2 (m/s) son las velocidades a la entrada (aguas arriba de la reja) y a la salida (aguas debajo de la reja), de igual forma y_1 (m) y y_2 (m) son los tirantes a la entrada (aguas arriba de la reja) y a la salida (aguas debajo de la reja). Con estos últimos valores se calculan las velocidades y tirantes promedio, indispensables para determinar el número de Froude NF para cada una de las simulaciones. Finalmente se calcula la eficiencia de captación de la reja E_{fc} expresada en porcentaje para cada variante. A continuación, se presenta la ecuación del número de Froude,

$$NF = V/(gD)^{1/2}$$

Donde:

D : Es la profundidad hidráulica (cociente entre el área y el ancho superficial de la sección transversal A/T), en el caso de canal con sección rectangular $D=y$

V : Es la velocidad media de circulación en una sección transversal del canal (m/s),

y : Tirante de circulación en una sección transversal (normal) del canal (m/s),

g : Aceleración de la gravedad 9,81 (m/s²),

Como el canal del estudio es de sección rectangular $D=y$ quedando la ecuación del número de Froude como se muestra a continuación.

$$NF=V/(gy)^{1/2}$$

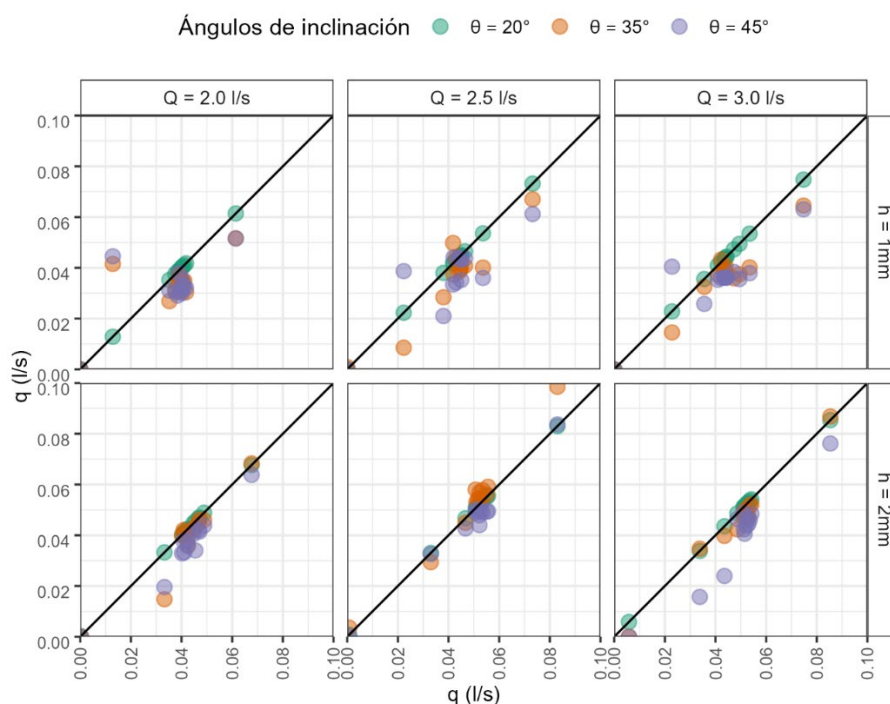


Figura 6. Tendencia Valores de caudales q (l/s) captados por cada separación entre barras de sección circular, para los diferentes Q (l/s), θ ($^\circ$) y h (mm).

Tabla 4. Parámetros hidráulicos de las rejillas de barras de sección circular, diámetro de barra 3mm,

Q (l/s)	θ ($^\circ$)	h (mm)	Δq (l/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	y_1 (m)	y_2 (m)	NF	Efc(%)
2,0	20	1,0	0,4677	1,788	1,994	0,01203	0,00838	6,165	23,38
2,0	35	1,0	0,4221	1,790	2,080	0,01202	0,00818	6,792	21,11
2,0	45	1,0	0,4189	1,794	2,130	0,01199	0,00803	7,445	20,94
2,0	20	2,0	0,5407	1,787	2,038	0,01203	0,00775	6,335	27,03
2,0	35	2,0	0,5046	1,789	2,122	0,01202	0,00750	6,984	25,23
2,0	45	2,0	0,4626	1,794	2,165	0,01199	0,00764	7,585	23,13
2,5	20	1,0	0,5391	1,822	2,040	0,01470	0,01030	5,690	21,57
2,5	35	1,0	0,4764	1,822	2,110	0,01480	0,01030	6,180	19,05
2,5	45	1,0	0,4782	1,822	2,150	0,01470	0,01010	6,770	19,13
2,5	30	2,0	0,6379	1,822	2,070	0,01480	0,00968	5,800	25,51
2,5	35	2,0	0,6793	1,822	2,150	0,01480	0,00912	6,390	27,17
2,5	45	2,0	0,5974	1,823	2,200	0,01470	0,00931	6,960	23,90
3,0	20	1,0	0,5419	1,840	2,063	0,01744	0,01276	5,243	18,06
3,0	35	1,0	0,4620	1,840	2,126	0,01754	0,01282	5,696	15,40
3,0	45	1,0	0,4568	1,846	2,166	0,01748	0,01252	6,219	15,23
3,0	20	2,0	0,6365	1,839	2,089	0,01744	0,01211	5,336	21,22
3,0	35	2,0	0,5973	1,839	2,162	0,01754	0,01194	5,813	19,91
3,0	45	2,0	0,5231	1,845	2,213	0,01748	0,01178	6,371	17,44

A continuación, se presenta la figura 7 donde se ubican 6 gráficas que muestran parte de los resultados obtenidos en las rejillas para cada uno de los experimentos numéricos realizados.

En el caso de la figura 7 se configuran 6 paneles donde para cada combinación de $Q(l/s)$ y $h(mm)$ se analiza la variación de la eficiencia de captación de las rejillas E_{fc} (%) con el número de Froude N_F promedio entre las zonas de entrada y salida de las rejillas, para los casos en que las rejillas se ubican en los ángulos de inclinación con la horizontal de: $\vartheta = 20^\circ$, 35° y 45° , toda esta información numérica se encuentra en la tabla 4.

Una primera conclusión que se puede obtener del análisis visual de los 6 paneles de la figura 7 es que, en todos los casos, con el incremento del ángulo de inclinación de las rejillas con respecto a la horizontal se incrementa el número de Froude N_F ya que aumentan las velocidades $V_1(m/s)$ y $V_2(m/s)$ y de igual forma disminuyen los tirantes $y_1(m)$ y $y_2(m)$. En el caso de la eficiencia de captación, es clara su tendencia a disminuir con el incremento del número de Froude, véase que en los casos de $h = 1mm$ y los tres caudales las curvas polinomiales de ajuste son convexas, mientras que para las mismas condiciones pero con una abertura mayor entre las rejillas, $h = 2mm$ la posición relativa de la eficiencia de captación para un caudal de entrada de $2,5 l/s$ se incrementa convirtiendo las curvas en cóncavas destacándose el caso de $Q = 2,5 l/s$, $h = 2 mm$ donde es claro que la mayor eficiencia de captación se obtiene para cuando las rejillas tienen el ángulo de inclinación intermedio $\vartheta = 35^\circ$, lo cual no deja de ser muy interesante y está en total concordancia con lo obtenido en la gráfica de la figura 6.

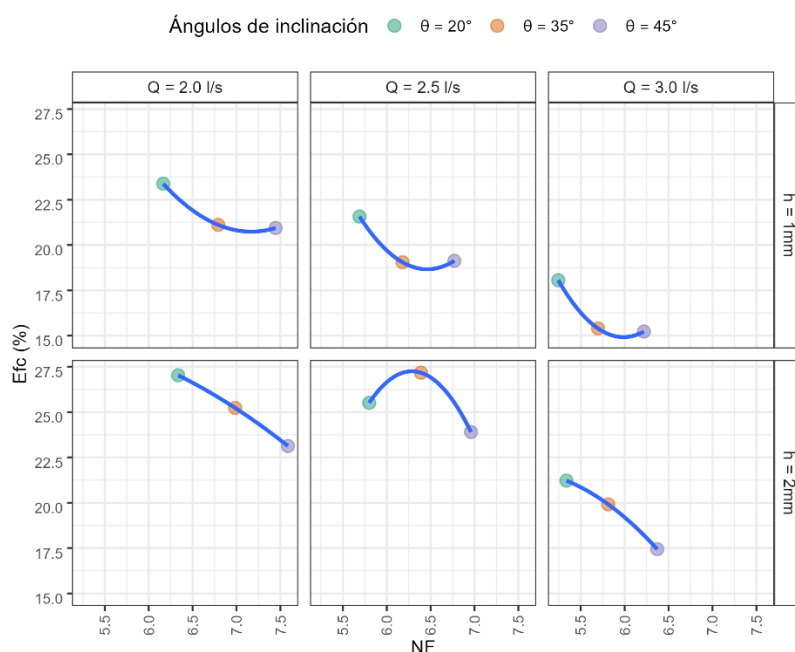


Figura 7. Relación entre los valores del número de Froude N_F y la eficiencia de captación de las rejillas E_{fc} (%), fijados los caudales de entrada al sistema.

Otro análisis importante que se pudiera realizar con los resultados obtenidos está relacionado con la variación del N_F , el caudal total captado por las rejillas y la eficiencia de captación, fijando el ángulo de inclinación y variando los caudales de entrada al sistema. Para analizar estos resultados se puede emplear las gráficas de la figura 7, sin embargo, es mejor el análisis con los gráficos de las figuras 8 y 9 en los que se fijan los paneles para cada ángulo de inclinación de las rejillas y los colores están asociados con los caudales de entrada.

Una primera conclusión importante de los gráficos de las figuras 8 y 9 es que, para un mismo espaciamiento entre barras, por ejemplo, $h = 1 \text{ mm}$ o $h = 2 \text{ mm}$, a medida que se tiene un caudal de entrada mayor al sistema, para un mismo ángulo de inclinación, disminuye el Número de Froude NF y esto ocurre ya que si bien con el aumento de caudal también aumenta la velocidad de circulación (véase que se encuentra en el numerador del NF), esta hace que tienda a incrementarse el NF , sin embargo, también se incrementa el tirante de circulación que al encontrarse en el denominador provoca una disminución del NF ; finalmente, para todos los casos, el efecto del tirante de circulación sobre el NF es mayor que el de la velocidad y por ende el NF desciende a medida que aumenta el caudal de entrada al sistema para un mismo ángulo de inclinación de las rejillas con respecto a la horizontal. Es importante aclarar que estos resultados son válidos para los caudales modelados.

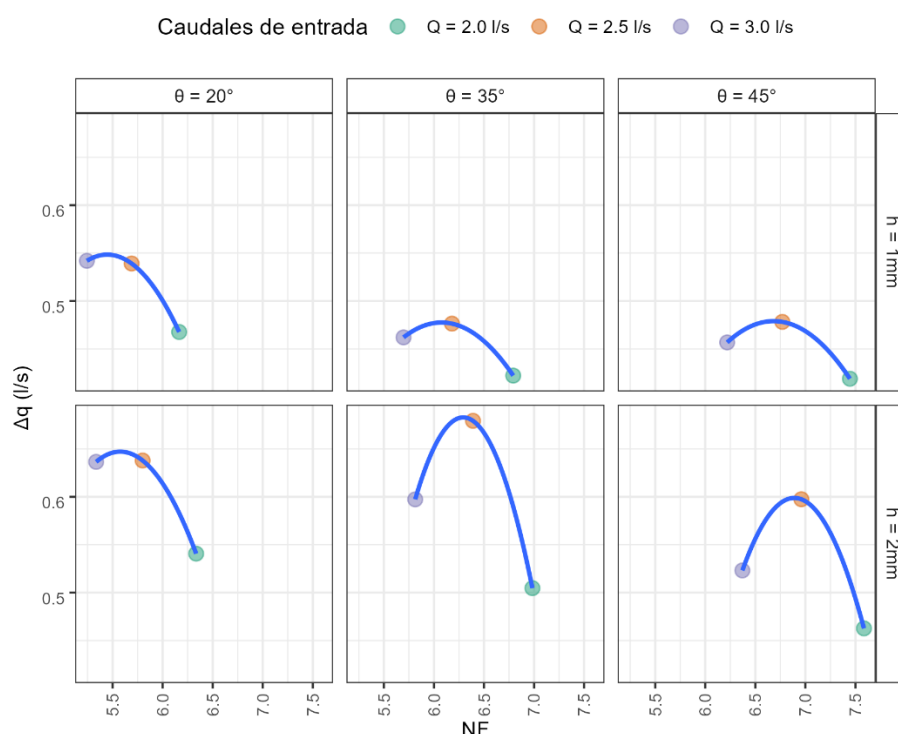


Figura 8. Relación entre los valores del número de Froude NF y el caudal total de captación de las rejillas $\Delta q \text{ (l/s)}$, fijados los ángulos de inclinación.

Con relación a los caudales captados por las rejillas, si se observa las gráficas de la figura 8 puede constatar que en todos los casos las funciones polinomiales de ajuste tienen una forma cóncava obteniéndose más caudal captado por las rejillas prácticamente en todos los casos cuando circula el caudal de entrada en el sistema $Q = 2,5 \text{ l/s}$, es decir el caudal intermedio (de los definidos en el estudio), fenómeno que se acentúa para el ángulo de inclinación de las rejillas de $\vartheta = 35^\circ$.

Con relación a la eficiencia de captación, el comportamiento es algo diferente, obsérvese en la figura 9 que en los paneles donde $h = 1 \text{ mm}$, para cada uno de los tres ángulos de inclinación de las rejillas, a medida que aumenta el NF y desciende el caudal de entrada hay un aumento de la eficiencia de captación.

En el caso de los paneles donde, $\vartheta = 35^\circ$ y 45° y $h = 2 \text{ mm}$ claramente las curvas de ajuste son cóncavas obteniéndose nuevamente una mayor eficiencia de captación para el caudal de entrada intermedio del estudio $Q = 2,5 \text{ l/s}$ y $\vartheta = 35^\circ$.

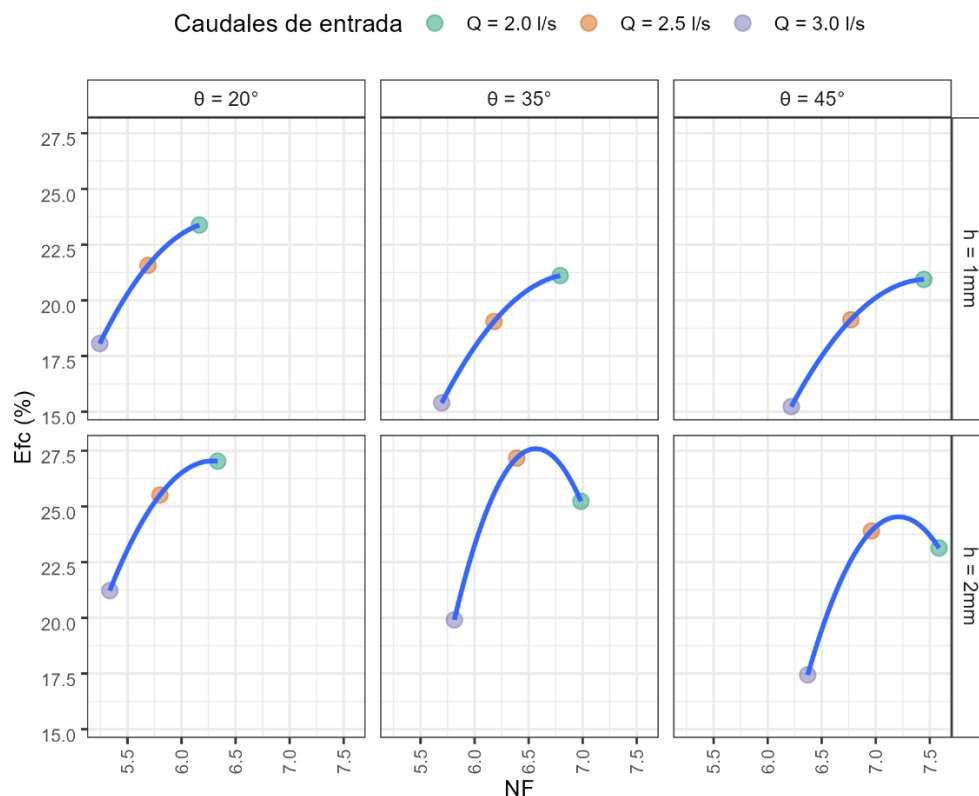


Figura 9. Relación entre los valores del número de Froude NF y la eficiencia de captación de las rejillas Δq (l/s), fijados los ángulos de inclinación.

Finalmente, de los gráficos anteriores se puede demostrar que con el incremento de la separación entre barras de $h = 1 \text{ mm}$ a 2 mm existe (para todas las variantes analizadas) un incremento significativo del caudal captado, así como de la eficiencia de captación las rejillas, en tal sentido se define el término $I_{cc} (\%)$ que se llamará incremento de caudal captado, se expresa en porciento y se obtiene restando los caudales o eficiencias obtenidas (para un mismo Q y ϑ) para $h = 2 \text{ mm}$ y $h = 1 \text{ mm}$, este resultado se divide por el caudal o eficiencia obtenido para cuando $h = 1 \text{ mm}$ y el resultado se multiplica por 100 para expresarlo en %.

Los resultados de I_{cc} son de 15,61%, 19,54% y 10,45% para los ángulos de inclinación $\vartheta = 20^\circ$, 35° y 45° respectivamente cuando $Q = 2,0 \text{ l/s}$, $I_{cc} = 18,31\%$, $42,59\%$ y $24,93\%$ para los ángulos de inclinación $\vartheta = 20^\circ$, 35° y 45° respectivamente cuando $Q = 2,5 \text{ l/s}$ y finalmente los valores de $I_{cc} = 17,44\%$, $29,28\%$ y $14,53\%$ para los ángulos de inclinación $\vartheta = 20^\circ$, 35° y 45° respectivamente cuando $Q = 3,0 \text{ l/s}$. De estos resultados resalta el 42,59% de incremento de caudal obtenido para el caudal de entrada de $Q = 2,5 \text{ l/s}$ para el ángulo $\theta = 35^\circ$, lo cual corrobora lo planteado con anterioridad en cuanto a que las mejores opciones de captación de las analizadas son para este caudal y ángulos intermedios demostrándose la existencia de un caudal y ángulo de inclinación óptimos en cuanto al caudal captado y su eficiencia, ver la figura 10.

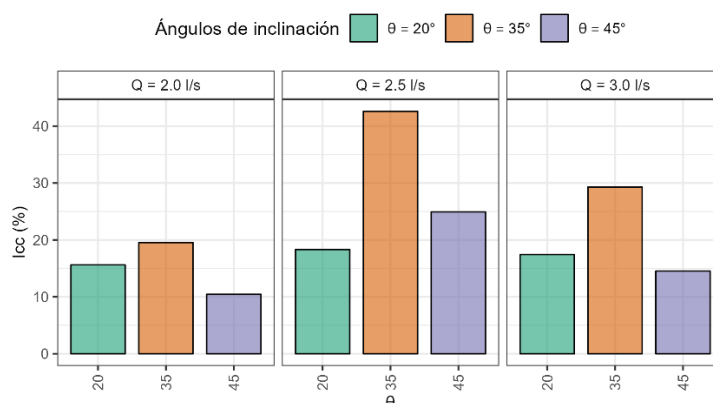


Figura 10. Valores de incremento de caudal y de eficiencia de captación I_{cc} (%) obtenidos por el aumento de espaciado entre barras de $h=1$ mm a 2 mm.

El análisis paramétrico CFD 2D de los prototipos de reja con barras de sección circular ha revelado que tanto el ángulo de inclinación del canal como la separación entre barras afectan significativamente la distribución del caudal captado. Este hallazgo es consistente con investigaciones previas, como la de Kuntzmann y Baluard (1954), quienes definieron la longitud de la reja en función de su inclinación y la relación del número de Froude a la entrada. De manera similar, los estudios experimentales de Nosedá (1956) corroboran que la pendiente tiene una influencia observable sobre el caudal derivado, aunque en su caso, las diferencias encontradas no superan el 7%. En este estudio, se ha observado una mayor variabilidad en la distribución del caudal, lo que podría estar vinculado a las condiciones específicas del flujo numérico modelado o a las características geométricas de las rejillas. Por otra parte, Orth (1954) también identificó la influencia de la inclinación en la captación del caudal y Mostkow (1957) y Krochin (1978) propusieron coeficientes de descarga decrecientes con el aumento de la inclinación. Los resultados actuales reflejan una tendencia similar, aunque el efecto es más pronunciado en los escenarios simulados con mayores inclinaciones.

Por último, el aumento del caudal de ingreso también influye en la uniformidad de la distribución del caudal captado. Conforme que el caudal de ingreso incrementa, el efecto del ángulo de inclinación sobre la distribución se intensifica, especialmente en configuraciones con separaciones más estrechas entre barras. Este resultado destaca la relevancia de considerar tanto la inclinación como la separación en el diseño de rejillas para captación eficiente.

03 CONCLUSIONES

Se crea un modelo paramétrico CFD bidimensional en el software ANSYS FLUENT 2020 R1 de rejillas de fondo sobre un canal supercrítico con el fin de captar agua. Para los experimentos se conciben tres caudales de entrada al canal $Q=2,0$ l/s, $2,5$ l/s y $3,0$ l/s, rejillas de fondo con barras circulares de diámetro $3,0$ mm y separaciones entre barras $h=1$ y 2 mm e inclinación de barras con la horizontal $\theta=20^\circ$, 35° y 45° .

Para todos los casos, en la primera ranura prácticamente no se capta caudal, en las ranuras 2, 3 y 4 existe un incremento gradual de caudal y a partir de esta última ranura hasta la 12 los caudales tienden a homogenizarse, experimentándose en la última ranura un incremento significativo del caudal captado.

Se demuestra en prácticamente todos los casos que para un caudal de entrada y una separación entre barras fijos existe una disminución del caudal captado por las rejillas con el aumento del ángulo de inclinación de las rejillas con respecto a la horizontal, excepto en el caso de $Q = 2,5 \text{ l/s}$ y $h = 2 \text{ mm}$ donde se obtiene que la mayor captación de caudal ocurre para $\theta = 35^\circ$ resultado que también fue obtenido por Carrión (2022) en un experimento físico, pero en ese caso con barras de 5 mm de diámetro y con sección transversal de las barras de tipo triangular, circular y semicircular, esto indica que existe un ángulo de inclinación óptimo que garantiza la maximización de caudal captado por las rejillas.

Se demuestra que para cada espaciamiento entre barras $h(\text{mm})$ y cada ángulo de inclinación del canal θ° , cuando se incrementa el caudal de entrada al sistema $Q(\text{l/s})$ ocurre una disminución del número de Froude a la entrada y salida de las rejillas. Con relación a los caudales totales captados por las rejillas, prácticamente para todos los experimentos se obtiene un mayor valor para el caudal de entrada al sistema $Q = 2,5 \text{ l/s}$, es decir el caudal intermedio (de los definidos en el estudio), fenómeno que se acentúa para el ángulo de inclinación de las rejillas de $\theta = 35^\circ$. Con relación a la eficiencia de captación también su máximo valor se obtiene para $Q = 2,5 \text{ l/s}$ y $\theta = 35^\circ$.

Se demuestra que tanto la eficiencia de captación como el caudal captado por las rejillas se incrementan de forma significativa con el aumento del espaciamiento entre barras. Para un cambio de espaciamiento entre barras $h = 1 \text{ mm}$ a $h = 2 \text{ mm}$ cuando:

- el caudal de entrada al sistema es $Q = 2,0 \text{ l/s}$, se tienen los siguientes incrementos de caudal captado por las rejillas 15,61%, 19,54% y 10,45% para los ángulos de inclinación $\theta = 20^\circ$, 35° y 45° respectivamente.
- el caudal de entrada al sistema es $Q = 2,5 \text{ l/s}$ se tienen los siguientes incrementos de caudal captado por las rejillas 18,31%, 42,59% y 24,93% para los ángulos de inclinación $\theta = 20^\circ$, 35° y 45° respectivamente.
- el caudal de entrada al sistema es $Q = 3,0 \text{ l/s}$ se tienen los siguientes incrementos de caudal captado por las rejillas 17,44%, 29,28% y 14,53% para los ángulos de inclinación $\theta = 20^\circ$, 35° y 45° respectivamente.

De estos resultados resalta el 42,59% de incremento de caudal obtenido para el caudal de entrada de $Q = 2,5 \text{ l/s}$ para el ángulo $\theta = 35^\circ$, con lo cual se demuestra que existe un caudal y ángulo de inclinación óptimos en cuanto al caudal captado y su eficiencia de captación.

04 REFERENCIAS

- Carrillo J. A.** (2024). Testing a smoothed-particle hydrodynamics (SPH) code to solve the hydrodynamics of a bottom intake Coanda screen, In Proceedings of the 10th International Symposium on Hydraulic Structures (ISHS) 2024, ETH Zurich.
- Carrión J.** (2019). Experimentación física y numérica del funcionamiento hidráulico de rejillas de efecto Coanda elaboradas con piezas mecanizadas (Tesis de pregrado), Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.
- Carrión D.** (2020). Estudio de la hidrodinámica de rejillas de captación de agua superficial construidas con barras circulares transversales al flujo (Tesis de pregrado), Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.

- Carrión E.** (2022). Experimentación física y numérica de la hidrodinámica local de rejillas de fondo transversales al flujo en captaciones de agua superficial, (Tesis doctoral), Universidad de Granada, España.
- Dzafo H., Metovic S. and Dzaferovic E.** (2021). Physical and Numerical Modeling of Water Flow Through Coanda-Effect Screens, *Advanced Technologies, Systems, and Applications V: Papers Selected by the Technical Sciences Division of the Bosnian-Herzegovinian American Academy of Arts and Sciences 2020*, 525-538.
- Krochin S.** (1978). *Diseño hidráulico*. Quito: Escuela Politécnica Nacional, ISBN: 978-9942-00-705-6. Ecuador.
- Kuntzmann J. and Bouvard M.** (1954). Theoretical Study of Bottom Type Water intake grids. *La Houille Blanche*, 40(5), 569–574, DOI: <https://doi.org/10.1051/lhb/1954049>, ISSN: 0018-6368.
- Mostkow M. A.** (1957). Theoretical Study of Bottom Type Water intake. *La Houille Blanche*, 43(4), 570–580, DOI: <https://doi.org/10.1051/lhb/1957048>, ISSN: 0018-6368
- Noseda G.** (1956) Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglia di fondo. *L'Energia Elettrica* 41-51, ISSN : 0013-7308
- Orth J., Chardonnet E. and Meynardi G.** (1954). Étude de grilles pour prises d'eau du type « en dessous ». *La Houille Blanche*, 40(3), 343–351, DOI: <https://doi.org/10.1051/lhb/1954034>, ISSN: 0018-6368
- Stefano, E., Prieto Fernández, A. P., & León Méndez, A. J.** (2021). Recomendaciones básicas para modelar obras hidráulicas empleando la dinámica de los fluidos computacional (CFD). *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42, 33-48. ISSN: 2788-6050, Cuba.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Daniel Alejandro Carrión Coronel <https://orcid.org/0009-0009-7861-0427>

Realizó contribuciones en la investigación, redacción, revisión y edición del documento.

Eric Cabrera Estupiñán <https://orcid.org/0000-0002-1266-2947>

Realizó contribuciones en la orientación, revisión de la investigación y redacción del documento, análisis y discusión de los resultados.

Eduardo Fernando Carrión Coronel <https://orcid.org/0000-0003-0427-5813>

Realizó contribuciones en la redacción, revisión, edición, supervisión y visualización del documento.