



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

**ÁREA TÉCNICA**

TITULACIÓN DE INGENIERO CIVIL

**Diseño de una central minihidráulica basada en vórtice gravitacional**

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

**AUTOR:** Rojas Asuero, Henry Vicente

**DIRECTOR:** Benavides Muñoz, Holger Manuel, Ph.D

LOJA – ECUADOR

2014

## **APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN**

Doctor.

Holger Manuel Benavides Muñoz.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

De mi consideración:

Que el presente trabajo de fin de titulación: Diseño de una central minihidráulica basada en vórtice gravitacional realizado por Rojas Asuero Henry Vicente, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Septiembre del 2014

f).....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Rojas Asuero, Henry Vicente declaro ser autor del presente trabajo de fin de titulación: Diseño de una central minihidráulica basada en vórtice gravitacional, de la Titulación de Ingeniero Civil, siendo Holger Manuel Benavides Muñoz director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad”

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....

Autor Rojas Asuero, Henry Vicente

Cédula 1104761307

## DEDICATORIA

A Dios, en quien sustento mi vida.

*“La constancia y la dedicación son la base del éxito”*

Es la frase que me acompaña desde la niñez. Papá, Mamá, es por Dios y ustedes que mi formación ha llegado a este punto, es gracias a Dios y a ustedes que a lo largo de mi vida he sabido superar las adversidades y los fracasos, y es gracias a Dios y a ustedes que he llegado a tener éxito en varios de mis emprendimientos. Los llevo siempre en el corazón. Los quiero mucho. Dedico a ustedes la presente investigación.

A mis hermanas y hermano, con quienes he compartido los momentos más felices de mi vida.

A todos mis amigos, pilares fundamentales en la consecución de esta meta.

Henry Rojas Asuero

## AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado a lo largo de mi vida, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, por estar presente en cada adversidad, por ser la base de mis sueños y esperanzas, por rodearme de personas maravillosas, y sobre todo, por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias, salud y felicidad.

Le doy gracias a mis padres, Nesler Vicente y Marcia Inés, por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, por ser mi más grande ejemplo de superación y perseverancia y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente formación.

A mis hermanas Karla Stefanía y Weneper Lisbeth, a mi hermano Ricardo Alejandro, a mi prima Michelle Alejandra y mi sobrina Naomi Fernanda por todo su apoyo incondicional, por estar presentes en mis momentos de fracaso y de éxito, por compartir conmigo tantos años, por demostrarme el valor de una familia y llenar mi vida de alegría y amor cuando más lo necesitaba.

Al Doctor Holger Benavides Muñoz, sin quien nada de esto sería posible, por haberse convertido en la persona más influyente en mi formación académica y científica, por demostrarme que el conocimiento hace grande a una persona, por ser un modelo de profesional y ser humano en mi vida.

A todos y cada uno de mis maestros por haber compartido conmigo sus conocimientos y experiencias, y de manera especial a la Ingeniera Mireya Lapo, al Ingeniero Edgar Pineda, y al Ingeniero Eduardo Carrión por sus valiosas enseñanzas y consejos dentro y fuera del salón de clase.

A toda mi familia, amigos y amigas, que me han apoyado en todo momento, gracias por brindarme su invaluable amistad y afecto.

A todo el grupo de Investigación de la sección de recursos hídricos de la Universidad Técnica Particular de Loja, y de manera especial a Edison Patiño, quien ha sido gran amigo y compañero de investigación durante varios años.

A todo el grupo Efe, Jose Luis, David Fernando, Gabriela Mercedes, Edison Carlos, Liliana Alexandra y Karla Daniela por su gran amistad y compañerismo a lo largo de este proceso formativo.

A mis amigos que desde la infancia me han apoyado, Hugo, Fernando, Andrés, Elvis, esto también va por ustedes.

A la Universidad Técnica Particular de Loja, por el apoyo institucional y económico en la consecución de la presente investigación.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS .....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABLAS.....	xvii
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. Introducción.....	5
1.2. Justificación.....	8
1.3. Objetivos .....	9
1.3.1. Objetivo general.....	9
1.3.2. Objetivos específicos.....	9
2.1. Energías renovables .....	11
2.2. Centrales eléctricas.....	12
2.2.1. Tipos de centrales eléctricas .....	12
2.2.2. Clasificación de las centrales eléctricas .....	13
2.3. Centrales hidroeléctricas.....	14
2.3.1. Clasificación de pequeñas centrales hidroeléctricas según su capacidad.....	14
2.3.2. Tipos de centrales hidroeléctricas .....	15
2.4. Turbinas hidráulicas .....	16
2.5. Micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional .....	20
2.6. Fundamento hidráulico.....	21
2.6.1. Diseño de canales no erosionables con flujo uniforme.....	21
2.6.2. Ecuación de continuidad.....	23
2.6.3. Ecuación de Bernoulli .....	24
2.7. Vórtice hidráulico.....	25
2.7.1. Vórtice gravitacional hidráulico .....	25
2.8. Movimiento de rotación .....	26
3.1. Análisis dimensional.....	28

3.1.1.	Diseño de canal, transición, tanque de circulación y cono de descarga..	28
3.1.2.	Diseño a escala de estructura hidráulica para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional.....	39
3.2.	Modelo físico para laboratorio .....	57
3.2.1.	Fabricación de canal de entrada, tanque de circulación y conos de descarga .....	58
3.2.2.	Turbinas para modelo experimental .....	63
3.2.3.	Módulo de transmisión para modelo experimental .....	64
3.2.4.	Acople a banco hidráulico y fabricación de sistema de soporte y recirculación.....	66
3.2.5.	Descripción del experimento .....	71
3.3.	Análisis numérico .....	76
4.1.	Tiempo de formación de vórtice gravitacional hidráulico.....	80
4.2.	Desempeño de grupo de turbinas con cono de descarga número uno .....	82
4.2.1.	Desempeño de turbina número uno .....	83
4.2.2.	Desempeño de turbina número dos.....	89
4.3.	Desempeño de grupo de turbinas con cono de descarga número dos .....	95
4.3.1.	Desempeño de turbina número uno .....	96
4.3.2.	Desempeño de turbina número dos.....	100
4.4.	Desempeño de grupo de turbinas con cono de descarga número tres .....	104
4.4.1.	Desempeño de turbina número uno .....	105
4.4.2.	Desempeño de turbina número dos.....	111
4.5.	Evaluación de influencia de cono de descarga .....	117
4.6.	Incremento en velocidad de flujo.....	119
4.7.	Voltaje generado y eficiencia del sistema a escala .....	122
CONCLUSIONES.....		124
RECOMENDACIONES .....		126
BIBLIOGRAFÍA .....		127



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Planta energética de vórtice gravitacional hidráulico de Zotlöterer
- Figura 2.** Esquema en planta de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional
- Figura 3.** Vista lateral de una sección de la micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional
- Figura 4.** Tipos de centrales eléctricas
- Figura 5.** Esquema de una central hidroeléctrica de pie de presa
- Figura 6.** Turbina de acción Pelton
- Figura 7.** Turbina de acción Michel o Banki
- Figura 8.** Turbinas hidráulicas de reacción: (a) Turbina Fourneyron (b) Turbina Heuschel-Jonval (c) Turbina Francis
- Figura 9.** Turbinas hidráulica de reacción Kaplan
- Figura 10.** Planta energética de vórtice gravitacional hidráulico de Zotlöterer
- Figura 11.** Perfil longitudinal y sección transversal de un canal
- Figura 12.** Modelo teórico de un vórtice compuesto o de Rankine
- Figura 13.** Características geométricas del tanque de circulación
- Figura 14.** Características geométricas del canal y transición
- Figura 15.** Representación gráfica de las secciones geométricas de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional
- Figura 16.** Estructura hidráulica para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

**Figura 17.** Perspectiva número uno de la vista tridimensional de la estructura hidráulica para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

**Figura 18.** Perspectiva número dos de la vista tridimensional de la estructura hidráulica para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

**Figura 19.** Perspectiva número tres de la vista tridimensional de la estructura hidráulica para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

**Figura 20.** Representación gráfica del módulo de generación con acceso para mantenimiento

**Figura 21.** Perspectiva en campo de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

**Figura 22.** Vista en planta de las características geométricas del canal y tanque de circulación del sistema a escala para laboratorio

**Figura 23.** Vista de las secciones transversales del tanque de circulación y canal del sistema a escala para laboratorio

**Figura 24.** Esquema general cono de descarga

**Figura 25.** Sección de vórtice gravitacional hidráulico

**Figura 26.** Diámetro de trabajo de turbinas uno y dos

**Figura 27.** Diámetro de trabajo de turbina tres

**Figura 28.** Características turbina número uno

**Figura 29.** Características turbina número dos

**Figura 30.** Características turbina número tres

**Figura 31.** Esquema de módulo de transmisión

**Figura 32.** Dimensiones y características geométricas de componentes del módulo de transmisión

**Figura 33.** Características geométricas de la caja de rodamientos

**Figura 34.** Referencia de rodamientos

**Figura 35.** Elementos constitutivos de estructura de soporte de tanque de circulación

**Figura 36.** Vista tridimensional de estructura de soporte de tanque de circulación

**Figura 37.** Vista en planta de estructura de soporte de tanque de circulación

**Figura 38.** Vista en elevación de estructura de soporte de tanque de circulación

**Figura 39.** Vista en elevación de estructura de soporte de canal de entrada

**Figura 40.** Vista tridimensional de estructura de soporte de canal de entrada

**Figura 41.** Vista en planta de estructura de soporte de canal de entrada y transición

**Figura 42.** Vista en elevación de elementos de la estructura de soporte de canal de entrada

**Figura 43.** Vista en elevación de elementos de la estructura de soporte de canal de entrada

**Figura 44.** Estructura de soporte con sistema de vórtice gravitacional

**Figura 45.** Estructura de soporte con sistema de recirculación

**Figura 46.** Trazado para fabricación de canal de entrada

**Figura 47.** Corte y doblaje de canal de entrada

**Figura 48.** Corte de base para canal de circulación

**Figura 49.** Tanque de circulación con orificio para cono de descarga

**Figura 50.** Canal de entrada y tanque de circulación

**Figura 51.** Canal de entrada y tanque de circulación con refuerzo

**Figura 52.** Proceso constructivo conos de descarga

- Figura 53.** Sistema de vórtice gravitacional para laboratorio
- Figura 54.** Turbina número uno
- Figura 55.** Turbina número dos
- Figura 56.** Turbina número tres
- Figura 57.** Módulo de trasmisión instalado
- Figura 58.** Módulo de trasmisión con turbina acoplada
- Figura 59.** Módulo de trasmisión con generador eléctrico
- Figura 60.** Acople del sistema a escala de vórtice gravitacional
- Figura 61.** Acople del sistema a escala de vórtice gravitacional en funcionamiento
- Figura 62.** Estructura de soporte de sistema a escala de vórtice gravitacional
- Figura 63.** Sistema a escala de vórtice gravitacional en funcionamiento
- Figura 64.** Sistema a escala de vórtice gravitacional con módulo de trasmisión en funcionamiento
- Figura 65.** Sistema de recirculación en funcionamiento
- Figura 66.** Vórtice gravitacional hidráulico estable
- Figura 67.** Puntos de medición de velocidad
- Figura 68.** Multiplicador de velocidad poleas
- Figura 69.** Multímetro digital de corriente alterna utilizado para la medición de voltaje
- Figura 70.** Esquema de vórtice para análisis de altura neta
- Figura 71.** Sistema a escala de vórtice gravitacional implementado en laboratorio
- Figura 72.** Sistema a escala de vórtice gravitacional en funcionamiento
- Figura 73.** Tiempo de formación vs caudal; cono uno y dos
- Figura 74.** Esquema cono de descarga número uno

**Figura 75.** Turbina número uno

**Figura 76.** Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono uno-turbina uno

**Figura 77.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

**Figura 78.** Características de posición para segundo ensayo de desempeño; cono uno-turbina uno

**Figura 79.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

**Figura 80.** Características de posición para tercer ensayo de desempeño; cono uno-turbina uno

**Figura 81.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

**Figura 82.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 4 cm, 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

**Figura 83.** Ubicación de mejor desempeño; cono uno-turbina uno

**Figura 84.** Turbina número dos

**Figura 85.** Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono uno-turbina dos

**Figura 86.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

**Figura 87.** Características de posición para segundo ensayo de desempeño; cono uno-turbina dos

**Figura 88.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

**Figura 89.** Características de posición para tercer ensayo de desempeño; cono uno-turbina dos

**Figura 90.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

**Figura 91.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 4 cm, 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

**Figura 92.** Ubicación de mejor desempeño; cono uno-turbina dos

**Figura 93.** Esquema cono de descarga número dos

**Figura 94.** Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono dos-turbina uno

**Figura 95.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos

**Figura 96.** Características de posición para segundo ensayo de desempeño; cono dos-turbina uno

**Figura 97.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos

**Figura 98.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos

**Figura 99.** Ubicación de mejor desempeño; cono dos-turbina uno

**Figura 100.** Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono dos-turbina dos

**Figura 101.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos

**Figura 102.** Características de posición para tercer ensayo de desempeño; cono dos-turbina dos

**Figura 103.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos

**Figura 104.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos

**Figura 105.** Ubicación de mejor desempeño; cono dos-turbina dos

**Figura 106.** Esquema cono de descarga número tres

**Figura 107.** Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono tres-turbina uno

**Figura 108.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

**Figura 109.** Características de posición para segundo ensayo de desempeño; cono tres-turbina uno

**Figura 110.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

**Figura 111.** Características de posición para tercer ensayo de desempeño; cono tres-turbina uno

**Figura 112.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

**Figura 113.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 4 cm, 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

**Figura 114.** Ubicación de mejor desempeño; cono tres-turbina uno

**Figura 115.** Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono tres-turbina dos

**Figura 116.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

**Figura 117.** Características de posición para segundo ensayo de desempeño; cono tres-turbina dos

**Figura 118.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

**Figura 119.** Características de posición para tercer ensayo de desempeño; cono tres-turbina dos

**Figura 120.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

**Figura 121.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 4 cm, 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

**Figura 122.** Ubicación de mejor desempeño; cono tres-turbina dos

**Figura 123.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno y cono número tres

**Figura 124.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno, cono número dos y cono número tres

**Figura 125.** Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno, cono número dos y cono número tres

**Figura 126.** Ubicación para ensayo de turbina número tres; cono de descarga número uno



## LISTA DE TABLAS

- Tabla 1.** Secciones hidráulicas óptimas
- Tabla 2.** Características geométricas del tanque de circulación
- Tabla 3.** Características geométricas del canal y transición
- Tabla 4.** Características geométricas del tanque de circulación a escala
- Tabla 5.** Características geométricas del canal y transición
- Tabla 6.** Dimensiones de conos de descarga para modelo experimental
- Tabla 7.** Promedio de medición de diámetro interior de vórtice ( $D_i$ ) a diferentes alturas
- Tabla 8.** Caudales y velocidad de trabajo de sistema a escala de vórtice gravitacional implementado en el laboratorio de hidráulica de la UTP
- Tabla 9.** Características técnicas generador utilizado
- Tabla 10.** Tiempo de formación de vórtice hidráulico; cono número uno
- Tabla 11.** Tiempo de formación de vórtice hidráulico; cono número dos
- Tabla 12.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales
- Tabla 13.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales
- Tabla 14.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales
- Tabla 15.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales

**Tabla 16.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales

**Tabla 17.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales

**Tabla 18.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos) para distintos caudales

**Tabla 19.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos) para distintos caudales

**Tabla 20.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos) para distintos caudales

**Tabla 21.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos) para distintos caudales

**Tabla 22.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales

**Tabla 23.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales

**Tabla 24.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales

**Tabla 25.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales

**Tabla 26.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales

**Tabla 27.** Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales

**Tabla 28.** Velocidad lineal para distintos caudales en canal de entrada

**Tabla 29.** Tirante en canal de entrada; velocidad angular de turbina número tres (ubicada sobre el orificio de descarga del cono número uno); radio de trabajo de turbina y velocidad lineal para distintos caudales

**Tabla 30.** Tirante en canal de entrada; velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno); radio de trabajo de turbina y velocidad lineal para distintos caudales

**Tabla 31.** Potencia generada por turbina número uno (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno)

**Tabla 32.** Potencia generada por turbina número tres (ubicada sobre el orificio de descarga del cono número uno)

**Tabla 33.** Potencia teórica para turbinas uno y tres

**Tabla 34.** Eficiencia turbinas uno y tres

## RESUMEN

Se presenta el diseño y estudio experimental de una estructura que tiene la capacidad de inducir artificialmente un vórtice hidráulico, cuyo movimiento rotacional puede ser aprovechado para generar energía eléctrica. A fin de proponer una estructura óptima que pueda operar en cualquier cauce de agua, la estructura diseñada se compone de un canal de entrada, seguido por una transición que se acopla a un tanque de circulación cuyo orificio de descarga se encuentra bajo un cono. El modelo físico de experimentación fue implementado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Técnica Particular de Loja. Experimentalmente se relacionó la velocidad angular del vórtice con el diámetro mayor del cono de descarga, en busca de los valores de velocidad angular con mayor magnitud, a través del cambio de esa variable geométrica. Los resultados muestran que la velocidad angular aumenta con la profundidad, y que además, en el caso de la estructura diseñada, depende de la dimensión del diámetro mayor del cono de descarga. En las condiciones ensayadas se obtuvo valores máximos de velocidad angular de hasta 132 rpm.

**PALABRAS CLAVES:** Energía renovable, vórtice gravitacional hidráulico, central hidroeléctrica, micro-central hidroeléctrica.

## ABSTRACT

Design and experimental study of a structure capable of inducing an artificially water vortex it is presented. In order to provide an optimum structure capable of operating in any stretch of water, the designed structure is composed of an input channel, followed by a transition that is coupled to a circulation tank whose discharge orifice is on a cone. The experimental physical model was implemented in the hydraulic laboratory of the Universidad Técnica Particular de Loja. Experimentally the angular velocity of the vortex was related with the larger diameter of the discharge cone. The results show that the angular velocity increases with depth. Also It depends upon the size of the largest diameter of the discharge cone. In test conditions was obtained maximum values of angular velocity of up to 132 rpm.

**KEYWORDS:** Renewable Energy, gravitational water vortex, hydroelectric, micro-hydro plant.

## INTRODUCCIÓN

Se presenta el diseño y estudio experimental de las características geométricas de una estructura que tenga la capacidad de inducir artificialmente un vórtice hidráulico, cuyo movimiento rotacional puede ser aprovechado para la implementación de una central minihidráulica basada en vórtice gravitacional. Este tipo de central hidroeléctrica es una alternativa altamente viable para la producción descentralizada de energía renovable sin CO<sub>2</sub>, lo que asegura la producción sostenible de energía. La eficiencia de la también conocida como micro-central hidroeléctrica de vórtice gravitacional se fundamenta en el poco espacio físico que requiere, sumado a su fácil mantenimiento lo cual extiende su vida útil. El mecanismo de funcionamiento de una micro-central hidroeléctrica de vórtice gravitacional es tal que, el agua de cualquier cauce es conducida a través de un canal hacia un tanque de circulación, que posee un orificio circular en su base. La combinación entre la baja presión en el orificio y la rotación del flujo, inducida por el ingreso tangencial del agua, genera un vórtice hidráulico, cuyo flujo rotacional es aprovechado para el funcionamiento de una turbina, la cual a través de un sistema de transmisión hace rotar un generador eléctrico.

Es incuestionable que el consumo de energía es un factor que siempre ha sido asociado con el hombre y su desarrollo. El uso de energía es tan importante en la actualidad, que incluso un índice para medir el nivel de desarrollo humano de un país es su consumo eléctrico per cápita. A través del tiempo la humanidad ha aprendido como aprovechar diversas fuentes de energía brindadas por la naturaleza, entre ellas la energía hidráulica, una fuente de energía limpia y renovable. Las centrales hidroeléctricas han marcado una era en la generación de energía, debido a que aprovechar este tipo de recurso presenta varias alternativas, entre las que se presenta la micro-central hidroeléctricas basada en vórtice gravitacional, un nuevo tipo de tecnología en auge, que busca convertirse en una fuente de abastecimiento energético para aquellas zonas, aledañas a cauces naturales de agua, que no poseen suministro por parte del Sistema Nacional de Generación, Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica.

Por lo tanto, se crea la necesidad de investigar y mejorar el accionar de este nuevo tipo de centrales, con miras al incremento de su aplicabilidad y eficiencia. La presente investigación desarrolla un prototipo eficiente de la estructura necesaria para la generación de un vórtice gravitacional hidráulico óptimo y funcional para la generación de energía eléctrica. La metodología utilizada tiene como punto de partida el análisis dimensional de los componentes del sistema de vórtice gravitacional, posteriormente se fabricó e implementó un modelo a escala de experimentación, para finalmente, a través del análisis de los resultados, determinar la eficiencia del sistema diseñado.

## **1. EXORDIO**

## 1.1. Introducción

La energía eléctrica es uno de los elementos fundamentales en el universo. Es un factor crítico e indispensable en cualquier aspiración de desarrollo económico y humano. Está presente en todas nuestras actividades cotidianas, ya que, es contraproducente pensar que aspectos como salud, transporte, educación, entre otros, pudieran desenvolverse en un ambiente favorable sin la necesidad de energía (Bilal, 2013).

En la última década, problemas relacionados con la energía eléctrica como, fluctuaciones en los precios de los combustibles a base de carbono, aumento de la demanda mundial de energía y la inminente necesidad de disipar el cambio climático, han generado un desafío energético a nivel mundial, debido a que este tipo de dificultades se encuentran en constante crecimiento. En consecuencia, han sido varios los esfuerzos conjuntos, de varios estados y organizaciones, para desarrollar estrategias sustentables que generen un cambio global del sector energético, con fundamento en las Energías Renovables. (Bilal, 2013; Aslani, Naaranoja, Helo, Antila & Hiltunen, 2013).

Las Energías Renovables juegan un papel importante en las estrategias energéticas y climáticas de muchos países a nivel mundial, entre ellos Ecuador, que en el transcurso de los últimos años ha desarrollado varias políticas nacionales, del sector energético, enfocadas al incremento de la capacidad de generación, eficiencia energética, uso de energías renovables y gestión eficiente del sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Debido a esto, Ecuador apuesta por la energía hidráulica como eje fundamental en el cambio y diversificación de la matriz energética. Muestra de ello, es que para el año 2016 se prevé que el 93% de la energía suministrada será de origen hidroeléctrico. (Aslani, et al., 2013; Albornoz, 2012)

La energía hidráulica es una de las energías renovables, más emblemáticas y aplicadas a nivel mundial, que ha sido desarrollada por varios investigadores a un ritmo bastante rápido, ya que es un hecho incuestionable que cerca del 70% de la superficie de la tierra está cubierta por agua. El agua ha sido utilizada a lo largo de toda la historia de la humanidad. No es sino hasta el descubrimiento de las hidroeléctricas que el hombre se percató que el agua es más importante de lo que se solía creer. A través de los años, se han desarrollado muchas hidroeléctricas con diversos conceptos y mecanismos de funcionamiento. Existen diferentes metodologías para generar energía a partir del agua. Por lo general, el medio ambiente y las condiciones físicas son los factores que determinan la aplicabilidad de una determinada central hidroeléctrica, que puede ser de gran potencia o una micro-central hidroeléctrica (Chan, 2012).



Una micro-central hidroeléctrica es una fuente de energía renovable eficiente y fiable, que aprovecha el potencial energético de pequeños ríos y arroyos. No requiere grandes embalses reguladores y, por ende, su impacto ambiental es limitado. La potencia generada por este tipo de centrales se encuentra en el rango de 1kW a 100 kW. Es un suministro descentralizado de energía. En la mayoría de los casos puede ser bastante rentable en términos financieros. De otro modo, puede presentar impactos positivos de gran repercusión social y ambiental, lo que justifica las subvenciones. La constante búsqueda de metodologías, y nuevas tecnologías, que mejoren la eficiencia de este tipo de centrales, ha brindado resultados favorables, entre los que se incluye la micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional (Bilal, 2013; Chan, 2012; Smail & Andrew, 2000).

La micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional es una nueva tecnología que aprovecha de manera eficiente la energía de rotación, de un gran vórtice hidráulico inducido artificialmente, creado a partir de una diferencia de carga relativamente pequeña en un tramo de cauce. Al ser conocido que las pérdidas de energía incrementan con respecto a la longitud, éstas son de considerable magnitud en grandes distancias, por lo que, la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional se convierte en una solución, viable y sustentable, para el abastecimiento energético de zonas rurales adyacentes a cauces naturales de agua. El mecanismo de funcionamiento es tal que, el agua del río es conducida a través de un canal hacia un tanque de circulación, que posee un orificio circular en su base. La combinación entre la baja presión en el orificio y la rotación del flujo, inducida por el ingreso tangencial del agua, genera un vórtice hidráulico. La Figura 1 muestra un ejemplo de vórtice gravitacional hidráulico utilizado para la generación de energía (Chan, 2012; Mulligan & Hull, 2010)



Figura 1. Planta energética de vórtice gravitacional hidráulico de Zotlöterer

Fuente: <http://xurl.es/5nyeg>

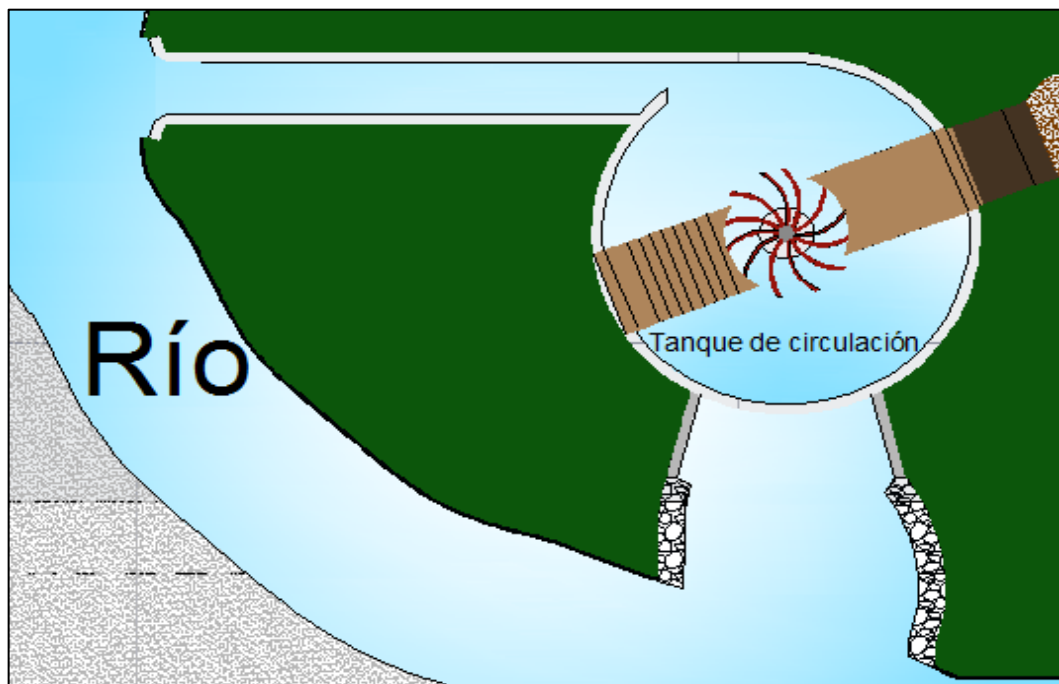
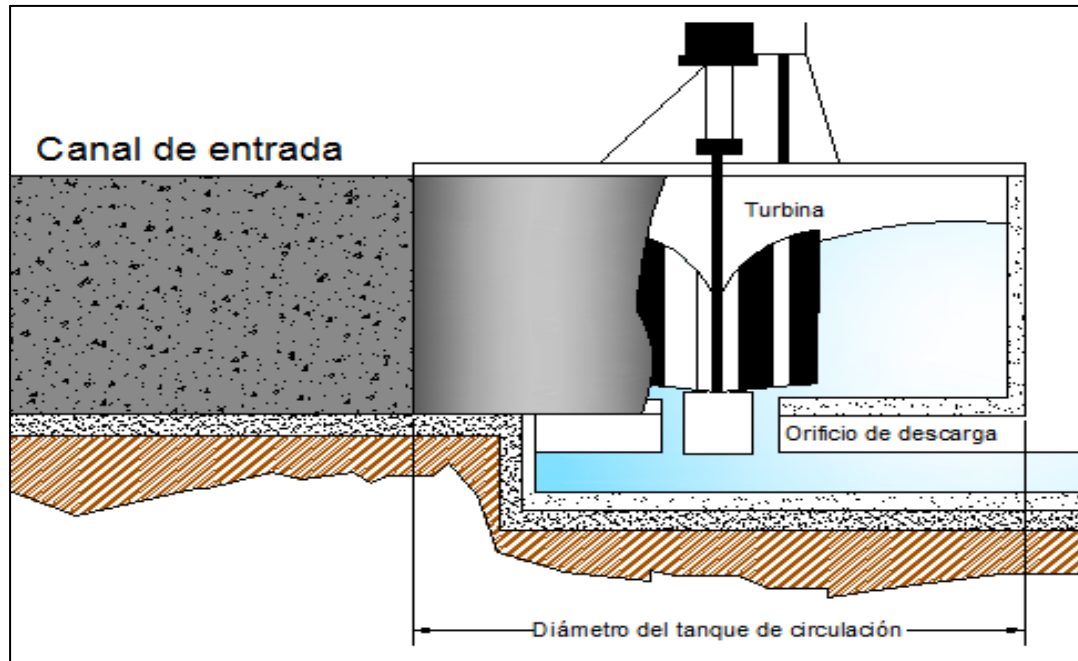


Figura 2. Esquema en planta de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

Fuente: Los autores



**Figura 3. Vista lateral de una sección de la micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional**

**Fuente:** Los autores.

## 1.2. Justificación

Es incuestionable que el consumo de energía es un factor que siempre ha sido asociado con el hombre y su desarrollo. El uso de energía es tan importante en la actualidad, que incluso un índice para medir el nivel de desarrollo humano de un país es su consumo eléctrico per cápita.

A través del tiempo la humanidad ha aprendido como aprovechar diversas fuentes de energía brindadas por la naturaleza, entre ellas la energía hidráulica, una fuente de energía limpia y renovable. Las centrales hidroeléctricas han marcado una era en la generación de energía, debido a que aprovechar este tipo de recurso presenta varias alternativas, entre las que se encuentra las micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional, un nuevo tipo de tecnología en auge que busca convertirse en una fuente de abastecimiento energético para aquellas zonas, aledañas a cauces naturales de agua, que no poseen suministro por parte del sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

Por lo tanto, se crea la necesidad de investigar y mejorar el accionar de este nuevo tipo de centrales con miras al incremento de su aplicabilidad y eficiencia. La presente investigación desarrolla un prototipo eficiente de la estructura necesaria para la generación de un vórtice gravitacional hidráulico, que sea óptimo para su futura implementación como recurso para la obtención de energía eléctrica.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Diseñar una estructura hidráulica eficiente, capaz de generar un vórtice gravitacional hidráulico óptimo, cuyo movimiento rotacional pueda ser aprovechado para generar electricidad.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Recopilar antecedentes investigativos referentes a la generación de energía a partir de vórtices hidráulicos.
- Diseñar un prototipo de estructura capaz de generar un vórtice gravitacional hidráulico aplicable a cualquier localidad adyacente a un cauce natural de agua.
- Diseñar un modelo a escala del prototipo original de la estructura de vórtice gravitacional.
- Construir el modelo a escala.
- Fabricar el grupo de turbinas para el modelo a escala.
- Realizar pruebas de laboratorio del sistema de vórtice gravitacional.

## **2. MARCO TEÓRICO**

## 2.1. Energías renovables

Las energías renovables son aquellas que se producen a partir de fuentes naturales de energía teóricamente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o debido a que son capaces de regenerarse a través de un ciclo natural no alterado. En el contexto del planeta tierra, el sol es el génesis de casi todas las energías renovables, debido a que, su energía calorífica produce en la tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de energía eólica; el sol es el principal responsable del ciclo del agua, por lo que, la energía hidráulica depende del sol; además, las plantas hacen uso de la energía solar para realizar la fotosíntesis y de esta manera vivir y crecer; toda esa materia vegetal es la biomasa, la cual es un recurso potencial para generar energía. Por último, el sol es aprovechado directamente a través de las energías solares, tanto térmica como fotovoltaica (Merino, 2010).

La utilización a gran escala de la energía renovable, o ER, es importante en los anhelos de elevar el nivel de vida de las poblaciones en los países en desarrollo y sobretodo en las aspiraciones de combatir el calentamiento global con la eliminación de la dependencia con respecto a los combustibles fósiles. Gran parte de la ER es hoy en día un campo naciente de investigación, para el que se desarrolla una nueva industria.

Existen diversos tipos de ER entre las cuales se destaca a las siguientes:

**Energía hídrica:** La energía hídrica, o hidráulica, es la energía que se obtiene al aprovechar la energía potencial y cinética del agua. De forma indirecta tiene al sol como origen. La radiación solar evapora parte del agua de los mares, lagos y ríos. El vapor asciende por la atmósfera, arrastrado por masas de aire cálido. Cuando el aire se enfría, no puede contener el vapor de agua y entonces se condensa. En ese momento se alcanza el punto de rocío, lo cual da origen a la formación de nubes; que posteriormente se transformarán en lluvia o en nieve, lo cual, asegura la perennidad del ciclo hidrológico. Luego, el efecto de la gravedad terrestre permite aprovechar los caudales de agua descendentes a través de las centrales hidroeléctricas, las cuales transforman en energía eléctrica el movimiento de turbinas, que se genera al precipitar una masa de agua entre dos puntos a diferente altura (Foro de la Industria Nuclear Española, 2013).

**Energía solar:** Es aquella que usa la radiación solar como fuente para la generación. La radiación solar (rayos solares) puede ser convertida en energía térmica para luego producir electricidad a través del clásico ciclo de vapor, o bien, puede almacenarse

directamente en colectores fotovoltaicos en los cuales se genera corriente eléctrica a través de la estimulación de sus celdas.

**Energía eólica:** La energía eólica es aquella que aprovecha las corrientes de aire para dar movimiento a turbinas, cuyo movimiento es convertido en otras formas útiles de energía para las actividades humanas. En la actualidad, la energía eólica es utilizada especialmente para generar electricidad.

**Energía de biomasa:** Es aquella que utiliza la materia orgánica. Por lo general hace uso de los residuos de las sustancias que forman parte de los seres vivos, para producir energía. La biomasa se puede aprovechar directamente a través de la combustión o puede ser transformada en alimentos o combustibles (Jarabo & Fernández, 1999).

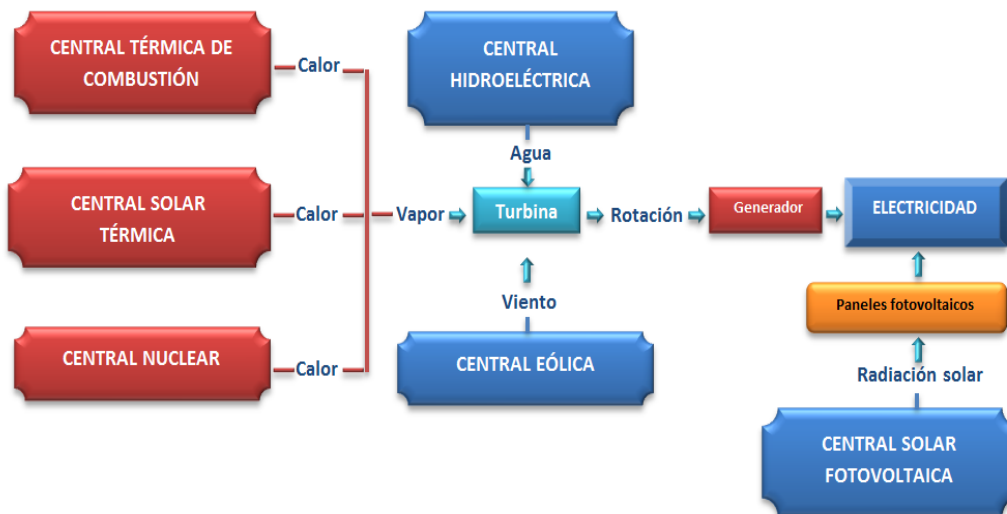
## **2.2. Centrales eléctricas**

Las centrales eléctricas son instalaciones que tienen como función transformar energía potencial en trabajo. Son aquellas encargadas de la producción de energía eléctrica. Por lo general se sitúan en las cercanías de fuentes básicas de energía como lo son: ríos, yacimientos de carbón, etc. La energía obtenida en un principio sufre varias transformaciones, previo a obtener la energía eléctrica final. De momento únicamente las centrales fotovoltaicas poseen la capacidad de generar electricidad directamente a partir de la energía del sol. En los otros casos, la energía eléctrica es producida por un generador, movido por una turbina (Secretaría de Energía, 2013).

Los generadores o alternadores son las máquinas encargadas de obtener electricidad. Este tipo de maquinaria es accionada por motores primarios. El generador junto al motor primario forman un conjunto denominado grupo (Secretaría de Energía, 2013).

### **2.2.1. Tipos de centrales eléctricas**

A continuación se presentan los principales tipos de centrales eléctricas. Lo que caracteriza a cada central es la fuente de energía empleada, así como el procedimiento a través del cual se genera la energía eléctrica (Castela, 2012).



**Figura 4. Tipos de centrales eléctricas**

**Fuente:** Los autores

En la Figura 4 se puede observar que la central térmica de combustión, la central solar térmica y la central nuclear producen calor, que es usado para producir vapor de agua, el cual actúa sobre una turbina de vapor. El movimiento de la turbina hace rotar el eje de un generador, lo cual transforma dicho movimiento en energía eléctrica (Castela, 2012).

Por otro lado, en una central hidroeléctrica la energía del agua es la encargada de hacer girar una turbina hidráulica, mientras que en una central eólica es el viento el que mueve la turbina. En ambos casos el movimiento rotatorio de la turbina es transformado en electricidad por el generador (Merino & Movillo, 2010).

No obstante, en una central fotovoltaica no se utiliza el grupo turbina-generador para producir electricidad, en el caso de este tipo de centrales, la electricidad se obtiene de forma directa gracias a los paneles fotovoltaicos (Secretaría de Energía, 2013).

### 2.2.2. Clasificación de las centrales eléctricas

Las centrales eléctricas pueden ser clasificadas, en base al servicio que otorgan, en:

- Centrales de base o centrales principales
- Centrales de punta
- Centrales de reserva
- Centrales de socorro



### **Centrales de base o centrales principales**

Son centrales que se caracterizan por su alta potencia, su función es proveer electricidad de forma ininterrumpida. Este tipo de centrales poseen grandes periodo de vida útil, y por lo general, se trata de centrales hidráulicas, térmicas o nucleares (Secretaría de Energía, 2013).

### **Centrales de punta**

Este tipo de centrales son las encargadas de suministrar energía eléctrica durante los picos de consumo; de esta manera se cubren las demandas de electricidad en horas punta. Debido a la capacidad de respuesta requerida, por lo general, suelen ser centrales hidráulicas o térmicas. Las centrales punta sirven de apoyo a las centrales base. (Merino & Movillo, 2010; Secretaría de Energía, 2013)

### **Centrales de reserva**

Son centrales con la capacidad de sustituir, de forma parcial o total, a las centrales base en situaciones de escases de materias primas (agua, carbón, etc.) o en caso de fallas mecánicas. Por lo general son centrales hidráulicas debido a su alta capacidad de respuesta. (Secretaría de Energía, 2013)

### **Centrales de socorro**

Este tipo de centrales tienen la misma función de las centrales de reserva, a diferencia que las centrales de socorro son pequeñas centrales autónomas y transportables que por lo general son accionadas por motores diésel. (Merino, 2010; Secretaría de Energía, 2013)

## **2.3. Centrales hidroeléctricas**

Por lo general, el costo de construcción de este tipo de centrales es elevado. La alta inversión inicial es compensada con los bajos costes de explotación y mantenimiento luego de la puesta en marcha. Como consecuencia de esto, las centrales hidroeléctricas son las centrales eléctricas de mayor rentabilidad.

### **2.3.1. Clasificación de pequeñas centrales hidroeléctricas según su capacidad**

Existen diversos criterios de clasificación de pequeñas centrales hidroeléctricas en función de su capacidad. Sin embargo, según la definición de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) se puede adoptar la siguiente clasificación (Merino & Movillo, 2010; Secretaría de Energía, 2013):

**Nano o pico-centrales:** Son centrales cuya potencia de generación es inferior a 1 kW. Son usadas con frecuencia para suministro familiar y aplicaciones mecánicas (Merino & Movillo, 2010; Secretaría de Energía, 2013).

**Micro-centrales:** Son centrales cuya potencia de generación se encuentra entre 1kW y 100kW. Son usadas, por lo general, para abastecer redes eléctricas comunales en sectores aislados (Merino, 2010; Secretaría de Energía, 2013).

**Mini-centrales:** Son centrales cuya potencia de generación se encuentra entre los 100 kW y 1000 kW. Son usadas para abastecer varias comunidades cercanas (Merino & Movillo, 2010; Secretaría de Energía, 2013).

### 2.3.2. Tipos de centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas, y dentro de ellas las mini y micro-centrales hidroeléctricas, se encuentran condicionadas por las características que presente el lugar en donde serán ubicadas.

En dependencia del lugar de emplazamiento de la central hidroeléctrica se realiza la siguiente clasificación:

- Centrales de pasada
- Centrales de pie de presa

#### Centrales de pasada

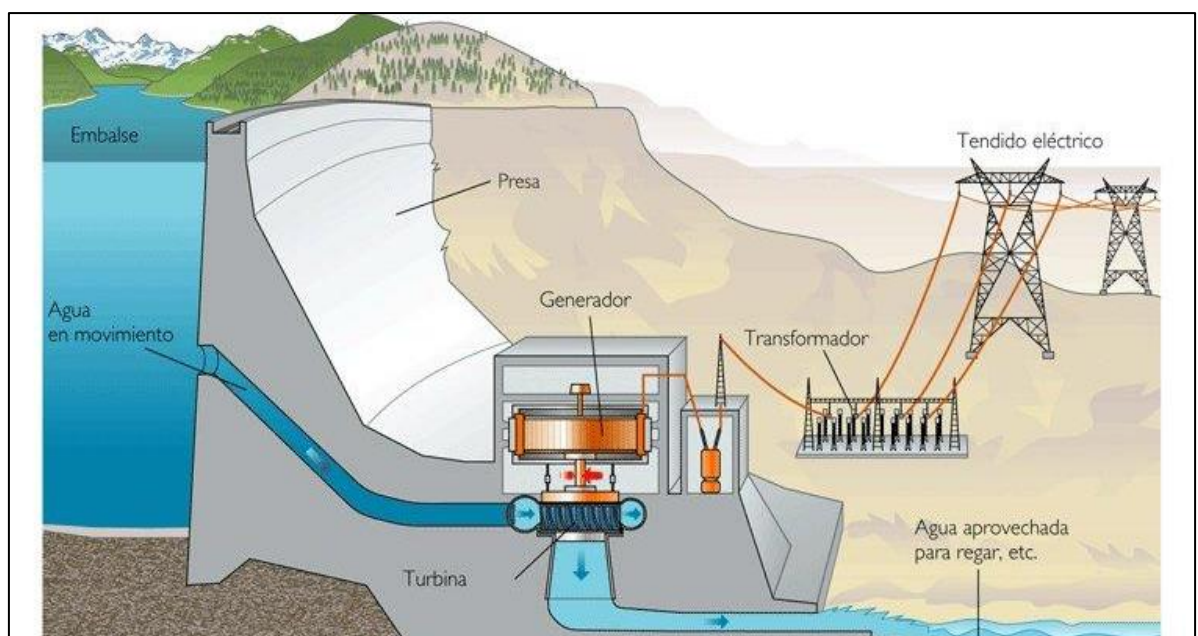
Son centrales que no poseen reservas de agua, por esta razón, el caudal con el que funcionan oscila según las estaciones del año. En la temporada en que las precipitaciones son abundantes, son capaces de alcanzar su máxima potencia. Por otro lado, durante la época seca la potencia disminuye en función del caudal. En este tipo de centrales es posible diferenciar los siguientes componentes:

- **Sistema de captación de aguas:** Se compone de una bocatoma o compuerta que capta el agua de su fuente (cauce natural, canal o embalse). Por lo general incluye un sistema de rejillas un desripador y un desarenador con el fin de evitar que arena u otros elementos extraños puedan desgastar, dañar o incluso detener la turbina. (Merino & Movillo, 2010)
- **Canal de aducción:** Es el encargado de conducir el agua desde el sistema de captación hasta el punto en que se aprovecha el caudal para generar energía eléctrica.

- **Casa de máquinas:** Es el lugar en donde se encuentran los mecanismos que hacen posible que se genere electricidad, de igual manera se encuentran los elementos de medición y control.
- **Línea de transmisión:** Es el sistema encargado de entregar la energía producida, ya sea a un usuario en particular o a un punto de distribución.
- **Canal de retorno:** Es el encargado de devolver el caudal aprovechado a su cauce natural.

### Centrales de pie de presa

Son centrales situadas en la parte baja de embalses destinados a usos hidroeléctricos, por lo que se logra aprovechar de esta manera el desnivel creado por la presa.



**Figura 5. Esquema de una central hidroeléctrica de pie de presa**

Fuente: <http://xurl.es/hhax4>

### 2.4. Turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas son dispositivos mecánicos con la capacidad de convertir la energía presente en una masa de fluido en trabajo. Una turbina hidráulica es una turbomáquina motora que absorbe energía de una corriente fluida, por lo general agua, y restituye energía mecánica. Debido a que se trata de una turbomáquina su principio de funcionamiento se basa en la ecuación de Euler. (Renedo, 2010)

Una turbomáquina monocelular, como lo es la turbina hidráulica, posee, esencialmente, una serie de álabes fijos y otra de álabes móviles. El conjunto de un órgano fijo y un órgano móvil conforma una célula. Una turbina hidráulica se compone de tres órganos diferentes, los cuales, deben ser atravesados, en un orden sucesivo, por la masa líquida; dichos elementos son el distribuidor, el rodete y el difusor (Fernández, 2010).

El distribuidor y difusor forman parte del estátor de la turbina, es decir, son órganos fijos; de igual manera como el rodete está siempre presente, el distribuidor y difusor pueden ser inexistentes en determinadas turbinas (Foro de la Industria Nuclear Española, 2013; Fernández, 2010).

El **distribuidor** es un órgano fijo cuya misión es dirigir el agua, desde la sección de entrada de la máquina hacia la entrada en el rodete, distribuyéndola alrededor del mismo, como es el caso de las turbinas de admisión total, o, la distribución puede ser a una parte, como en las turbinas de admisión parcial, en este tipo de turbinas es posible regular el agua que entra a la misma; es posible, desde cerrar el paso totalmente, caudal cero, hasta lograr el caudal máximo. El distribuidor es también un órgano con la capacidad de transformar la energía de presión en energía de velocidad (Fernández, 2010; Mataix, 2008)

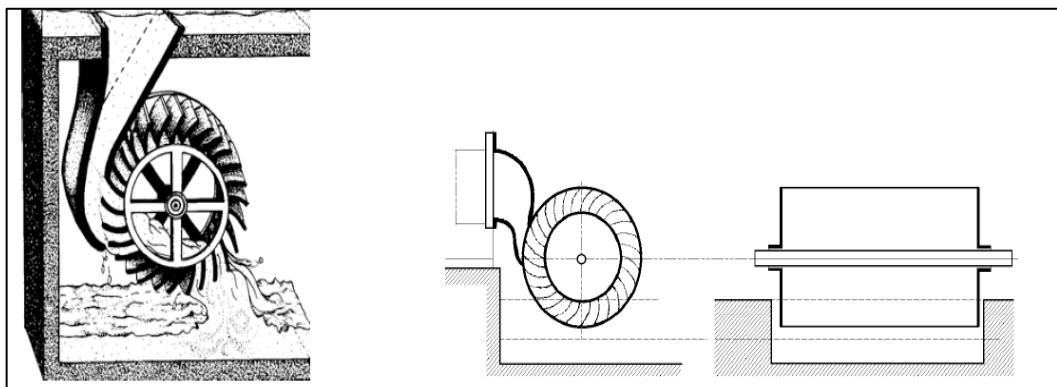
El **rodete** es el elemento principal de la turbina, ya que, está provisto de álabes en los que tiene lugar el intercambio de energía entre el agua y la máquina. En dependencia de que la presión varíe o no, en el rodete, las turbinas se clasifican en: turbomáquinas de acción o impulsión y turbomáquinas de reacción o sobrepresión (Fernández, 2010; Mataix, 2008).

En las turbinas de acción el agua sale del distribuidor a la presión atmosférica, y llega al rodete con la misma presión. En estas turbinas toda la energía potencial, generada por efecto del desnivel, se trasmite al rodete en forma de energía cinética. Dentro del grupo de turbinas de acción se puede diferenciar a la turbina Zuppinger -que es una turbina con rueda tangencial de cucharas, creada en el año de 1846- la turbina Pelton, Figura 6, la turbina Schwamkrug, la turbina Girad y la turbina Michel o Banki, Figura 7. (15) En el Anexo 2 se especifica con mayor detalle, a través de imágenes, los elementos constitutivos de una turbina hidráulica.



**Figura 6. Turbina de acción Pelton**

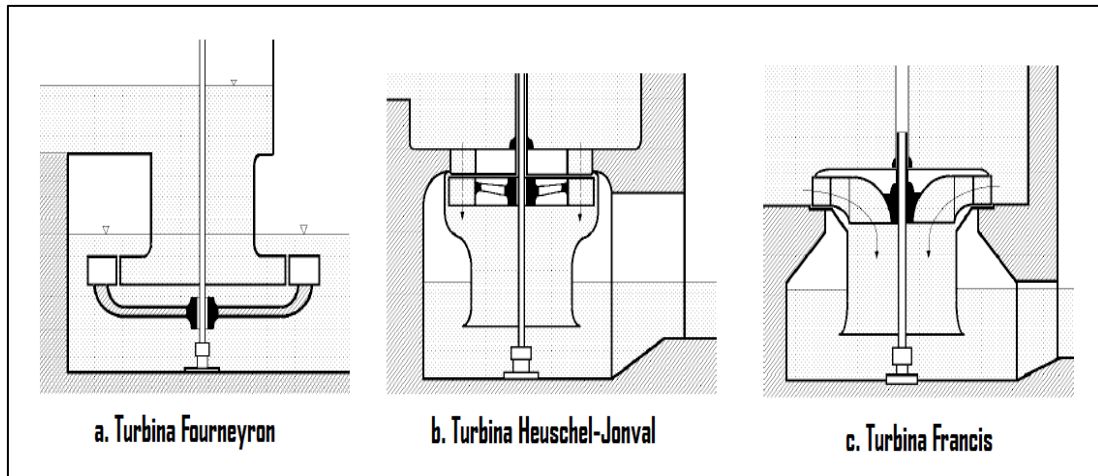
**Fuente:** <http://xurl.es/nt0us>



**Figura 7. Turbina de acción Michel o Banki**

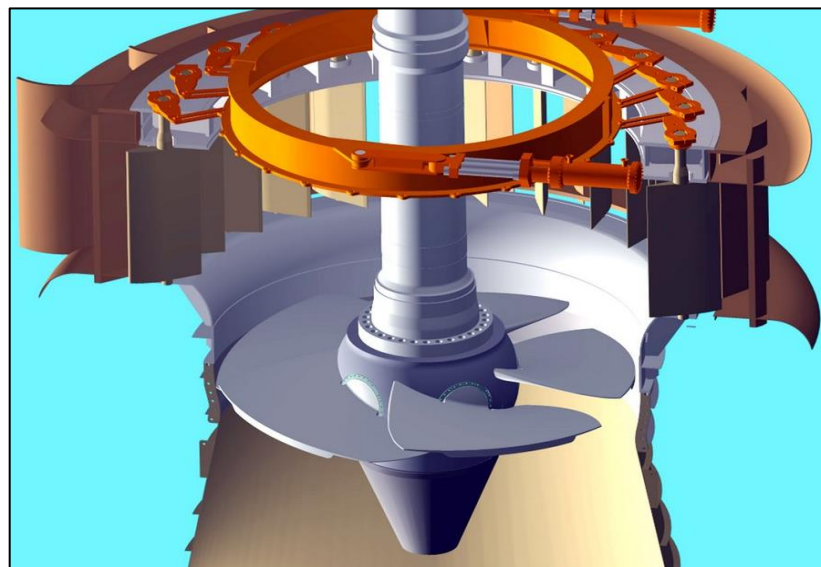
**Fuente:** Fernández Pedro, Turbinas Hidráulicas (2010)

En las turbinas de reacción, el agua sale del distribuidor con una determinada presión, la cual disminuye a medida que el agua atraviesa los álabes del rodete, de esta manera la presión a la salida puede ser nula o incluso negativa. En este tipo de turbinas el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete; de esta manera la energía potencial es transformada, una parte, en energía cinética y la otra, en energía de presión. Dentro de las turbinas de reacción se puede diferenciar la turbina Fourneyron, Figura 8.a, la turbina Heuschel-Jonval, Figura 8.b, la turbina Francis, Figura 8.c y la turbina Kaplan, Figura 9 (Fernández, 2010).



**Figura 8. Turbinas hidráulicas de reacción: (a) Turbina Fourneyron (b) Turbina Heuschel-Jonval (c) Turbina Francis**

**Fuente:** Fernández Pedro, Turbinas Hidráulicas (2010)



**Figura 9. Turbinas hidráulica de reacción Kaplan**

**Fuente:** <http://xurl.es/uu2v0>

El **difusor o tubo de aspiración** es un conducto de desagüe, por lo general posee un ensanchamiento progresivo, recto o acodado, que sale del rodete y conduce el agua hacia el canal de fuga, lo que permite de esta manera recuperar, en parte, la energía cinética a la salida del rodete. Si la turbina no posee tubo de aspiración se la conoce como turbina de escape libre (Mataix, 2010).

En las turbinas de acción, el empuje y la acción del agua, coinciden. Por otro lado en las turbinas de reacción el empuje y la acción del agua son opuestos (Fernández, 2010).

## 2.5. Micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

La micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional es una nueva tecnología que aprovecha de manera eficiente la energía de rotación, de un gran vórtice hidráulico inducido artificialmente, creado a partir de una diferencia de carga relativamente pequeña en un tramo de cauce. El mecanismo de funcionamiento es tal que, el agua del río es conducida a través de un canal hacia un tanque de circulación, que posee un orificio circular en su base. La combinación entre la baja presión en el orificio y la rotación del flujo, inducida por el ingreso tangencial del agua, genera un vórtice hidráulico, el cual es aprovechado para hacer rotar una turbina hidráulica, cuya energía mecánica es utilizada para generar electricidad. En la Figura 10 se muestra el ejemplo de vórtice gravitacional hidráulico utilizado para la generación de energía (Chan, 2012; Mulligan & Hull, 2010).



**Figura 10. Planta energética de vórtice gravitacional hidráulico de Zotlöterer**

**Fuente:** <http://xurl.es/6zyff>

En teoría, la potencia eléctrica que se puede obtener a partir de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional, puede ser determinada a través de la siguiente expresión (Mulligan & Hull, 2010):

$$P(\text{vórtice}) = \rho \times g \times Z_v \times Q \quad [1]$$

Donde  $\rho = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ,  $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  y  $Z_v = \text{altura del vórtice}$ , Potencia en Watts.

## 2.6. Fundamento hidráulico

### 2.6.1. Diseño de canales no erosionables con flujo uniforme

Es un hecho que la mayoría de los canales artificiales revestidos pueden resistir de manera satisfactoria la erosión, por lo tanto, son considerados como no erosionables. En este tipo de canales factores como velocidad máxima permisible o tensión tractiva no forman parte de los criterios a considerar para el diseño. Las dimensiones son determinadas con principal fundamento en una ecuación de flujo uniforme; por lo que se adopta las dimensiones finales en función de la máxima eficiencia hidráulica y aspectos prácticos constructivos. Las variables a considerar en el proceso de diseño son: el tipo de material que conformará el canal, lo cual determina el coeficiente de rugosidad; la velocidad mínima permisible, para evitar que partículas como limos se depositen en el fondo del canal; la pendiente del fondo del canal y las pendientes laterales; el borde libre y la sección más óptima ya sea determinada hidráulica o empíricamente (Chow, 1994; Krochin, 2011)

Entre los **materiales no erosionables** considerados para el diseño de canales se incluyen concreto, mampostería, hierro fundido, madera, vidrio, plástico, etc. La selección del tipo de material depende, fundamentalmente, de la disponibilidad y el costo de éste, el proceso constructivo y el propósito para el cual se diseña el canal (Chow, 1994; Krochin, 2011).

La **velocidad mínima** permisible o también conocida como velocidad no sedimentante es la menor velocidad que no permite el inicio de la sedimentación. Su valor es muy incierto, pero, en términos generales se puede adoptar una velocidad media de 0,60 a 0,90 m/s siempre y cuando el porcentaje de limos presente en el canal sea pequeño (Chow, 1994; Krochin, 2011).

La **pendiente longitudinal** del fondo de una canal está dada, por lo general, por la topografía y por la altura de energía requerida para el flujo del agua. Muchas de las veces, la pendiente se encuentra en función del propósito del canal; por ejemplo, los canales que tienen como fin la distribución de agua, como los utilizados en irrigación, abastecimientos de agua, minería hidráulica y proyectos hidroeléctricos requieren un alto nivel en el punto de entrega. Por lo tanto, es conveniente una pendiente pequeña, para de este modo mantener en el mínimo posible las pérdidas en elevación (Chow, 1994; Krochin, 2011).

El **borde libre** de un canal es la distancia vertical desde la parte superior del canal hasta la superficie del agua en la condición de diseño. Esta distancia debe ser lo



suficientemente grande como para prevenir que ondas o fluctuaciones en la superficie del agua originen reboses por encima de los lados. (Chow, 1994)

Se conoce que la conductividad de una sección de canal incrementa al ampliar la magnitud del radio hidráulico o al disminuir el perímetro mojado. En razón de esto, desde un punto de vista hidráulico, la sección con el menor perímetro hidráulico, para un área determinada, posee la máxima conductividad; tal sección se conoce como **sección hidráulica óptima** (Chow, 1994). Los elementos geométricos para seis secciones hidráulicas óptimas se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Secciones hidráulicas óptimas**

Sección transversal	Área A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Ancho superficial T	Profundidad hidráulica D	Factor de sección Z
Trapezio, medio hexágono	$\sqrt{3}y^2$	$2\sqrt{3}y$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{4}{3}\sqrt{3}y$	$\frac{3}{4}y$	$\frac{3}{2}y^{2.5}$
Rectángulo, medio cuadrado	$2y^2$	$4y$	$\frac{1}{2}y$	$2y$	$y$	$2y^{2.5}$
Triángulo, medio cuadrado	$y^2$	$2\sqrt{2}y$	$\frac{1}{4}\sqrt{2}y$	$2y$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{\sqrt{2}}{2}y^{2.5}$
Semicírculo	$\frac{\pi}{2}y^2$	$\pi y$	$\frac{1}{2}y$	$2y$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}y^{2.5}$
Parábola $T = 2\sqrt{2}y$	$\frac{4}{3}\sqrt{2}y^2$	$\frac{8}{3}\sqrt{2}y$	$\frac{1}{2}y$	$2\sqrt{2}y$	$\frac{2}{3}y$	$\frac{8}{3}\sqrt{3}y^{2.5}$
Catenaria hidrostática	$1.39586y^2$	$2.9836y$	$0.46784y$	$1.917532y$	$0.72795y$	$1.19093y^{2.5}$

Fuente: Ven Te Chow, Hidráulica de Canales Abiertos. (1994)

### 2.6.1.1. Transiciones en canales

En diseño de canales, existen ocasiones en las que se tiene que pasar de una sección con una base de determinada magnitud a una más estrecha. Por este motivo es aconsejable intercalar entre las dos secciones una transición, es decir, una estructura en la cual este cambio de sección se hace en forma gradual, con el fin de conseguir que la pérdida de carga sea mínima (Krochin, 2011).

Según el Boreau of Reclamation se recomienda que el ángulo máximo entre el eje del canal y una línea que une los lados de la transición a la entrada y a la salida no exceda de  $12.5^\circ$ . Esto permite determinar la longitud de la transición (Krochin, 2011).

$$L = \frac{b_1 - b_2}{\text{tg}(12.5)} \quad [2]$$

Donde  $b_1$  y  $b_2$  son los anchos mayor y menos respectivamente.

### 2.6.1.2. Cálculo de las dimensiones de la sección

Para el cálculo de las dimensiones de la sección para canales no erosionables se incluye la siguiente metodología:

- Recolectar toda la información necesaria, a partir de esto, se debe estimar un coeficiente de rugosidad  $n$  y seleccionar una pendiente adecuada  $S$  (Chow, 1994).
- Calcular el factor de sección  $AR^{2/3}$  mediante la siguiente ecuación:

$$A \times R^{\frac{2}{3}} = \frac{n \times Q}{\sqrt{S}} \quad [3]$$

- Sustituir en la ecuación, según la sección, las expresiones de área y radio hidráulico,  $A$  y  $R$  respectivamente, y resolver para la profundidad. En caso de existir otras incógnitas, como  $b$  y  $z$  para una sección trapezoidal, entonces se debe suponer los valores de estas variables y resolver. Al suponer varios valores de las incógnitas, puede obtenerse cierto número de combinaciones de dimensiones de la sección. Las dimensiones finales son seleccionadas en función de la eficiencia hidráulica y aspectos constructivos (Chow, 1994).

### 2.6.2. Ecuación de continuidad

El caudal  $Q$ , o el volumen de fluido que circula por una sección en la unidad de tiempo, está dado por:

$$Q = A \times V \quad [4]$$

Donde  $V$  es la velocidad media de la sección normal al flujo, de área transversal  $A$ , como se muestra en la Figura 11.

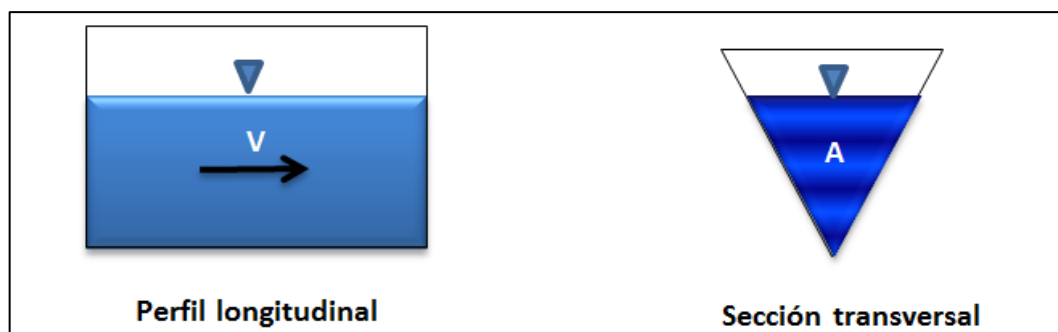


Figura 11. Perfil longitudinal y sección transversal de un canal

Cuando el caudal es constante en un tramo, la ecuación que gobierna el flujo, desde el punto de vista de la conservación de masa, se denomina ecuación de continuidad. Esta ecuación aplicada a las secciones 1, 2, 3...n se puede representar:

$$A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2 = A_3 \times V_3 = \dots = A_n \times V_n = \text{constante} \quad [5]$$

### 2.6.3. Ecuación de Bernoulli

El teorema o ecuación de Bernoulli expone el comportamiento de un fluido en movimiento, bajo la acción de la gravedad. Basados en la deducción realizada por Bernoulli se conoce que la energía de un fluido en cualquier punto consta de tres partes: la altura de energía cinética, la altura de energía de flujo y la altura de energía potencial geodésica. La sumatoria de las tres alturas de energía, es constante en cualquier punto de la conducción. Ese valor obtenido se denomina altura de carga.

La **altura de energía cinética** es la energía que se requiere para lograr la velocidad del líquido en un punto determinado.

$$hc = \frac{V^2}{2 \times g} \quad [6]$$

Donde **V** es la velocidad del flujo y **g** es la aceleración debida a la gravedad.

La **altura de energía de flujo** es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.

$$hp = \frac{P}{\gamma} \quad [7]$$

Donde **P** es la presión en una sección determinada y **γ** es el peso específico del líquido (constante).

La **altura de energía potencial geodésica** es la altura existente entre el punto considerado y una línea horizontal de referencia.

$$hg = Z \quad [8]$$

Basados en la Ecuación de Bernoulli se puede expresar matemáticamente la siguiente igualdad entre dos puntos A y B.

$$\frac{V_A^2}{2 \times g} + \frac{P_A}{\gamma} + Z_A = \frac{V_B^2}{2 \times g} + \frac{P_B}{\gamma} + Z_B = \text{constante} = H \quad [9]$$

Se considera que la Ecuación de Bernoulli tiene validades siempre y cuando no se produzcan turbulencias ni rozamientos entre el líquido y la paredes del conducto. Por esta razón el valor de la altura de carga no es constante, ya que éste decrece a lo largo del conducto. Esta disminución recibe el nombre de pérdida de carga ( $J$ ). De esta manera la expresión matemática del teorema de Bernoulli sufre la siguiente modificación.

$$\frac{V_A^2}{2 \times g} + \frac{P_A}{\gamma} + Z_A = \frac{V_B^2}{2 \times g} + \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + J_{AB} \quad [10]$$

Donde  $J_{AB}$  es la pérdida de carga en metros, producida entre los puntos A y B.

## 2.7. Vórtice hidráulico

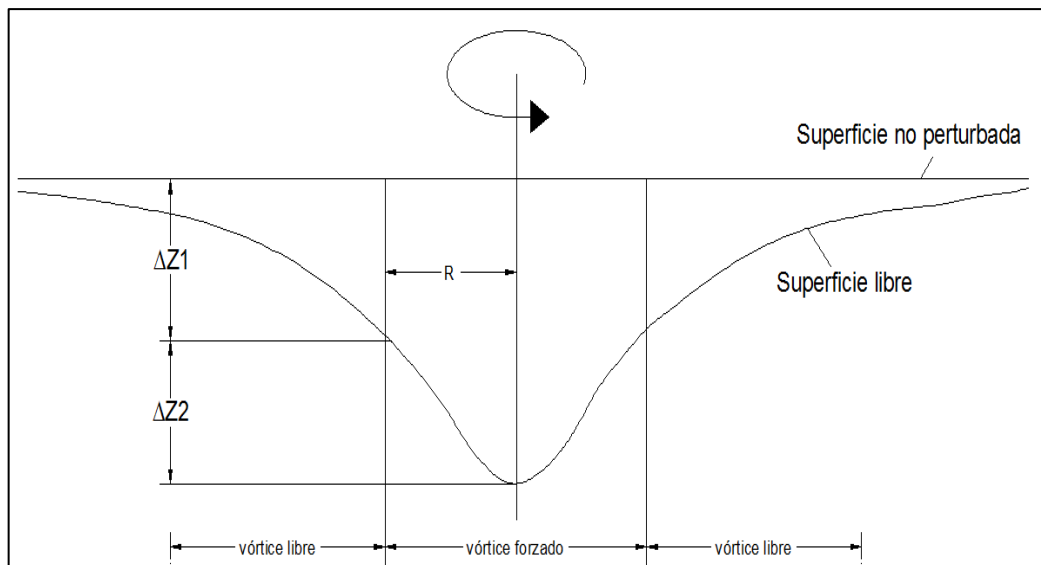
Cuando una masa de fluido adquiere un movimiento de rotación alrededor de un eje, aparecen diversas fuerzas reales, la cuales inducen un gradual hundimiento de la masa del fluido en la zona cercana al eje, formándose de esta forma un menisco en el que la parte central se encuentra a menor altura que la parte más alejada del eje. Se puede considerar como ejemplo de este tipo de fluidos en rotación, los remolinos de agua marina, los anticiclones, los ciclones, los tornados y los huracanes; fenómenos que son muy comunes en la superficie terrestre (Manjón, Villalba, Arribas, Najera, Beléndes & Monsoriu, 2013).

Un ejemplo frecuente de la formación de vórtices es cuando se revuelve un fluido. Al momento de girar la cuchara en círculos, con una velocidad angular constante, se puede observar cómo se mantiene el vórtice, es decir, la diferencia en altura  $z$  de la superficie libre del líquido para dos distancias  $r$  al eje de rotación es relativamente igual. Esto es una característica propia de los vórtices estacionarios. Por otro lado al dejar de mover en círculos la cuchara, se puede observar que la altura del vórtice decrece, debido a la pérdida de energía producto de varias fricciones. Esta disipación de energía es característica de los vórtices no estacionarios (Manjón et al., 2013).

### 2.7.1. Vórtice gravitacional hidráulico

El vórtice gravitacional hidráulico presenta las características de un vórtice compuesto o de Rankine. La zona central de este tipo de vórtice tiene tendencia a rotar como un sólido respecto a un eje, lo que se interpreta físicamente como un vórtice forzado, el cual se encuentra rodeado por un vórtice libre, que se distingue del vórtice forzado por el hecho de que cada partícula se mueve en una trayectoria circular, a una velocidad inversamente proporcional a la distancia hacia el centro de rotación. La velocidad en el

radio común del vórtice libre y el vórtice forzado, debe ser igual para evitar discontinuidad física y matemática (Torres, 2012)



**Figura 12. Modelo teórico de un vórtice compuesto o de Rankine**

Fuente: <http://xurl.es/ekot0>

## 2.8. Movimiento de rotación

Se denomina rotación al movimiento de cambio de orientación de un cuerpo o un sistema de referencia de forma que una línea (denominada eje de rotación) permanece fija.

La velocidad angular es la velocidad de rotación de un sólido rígido. Se define como el ángulo girado por una unidad de tiempo y se representa con la letra griega omega ( $\omega$ ), cuya unidad en el Sistema Internacional es el radián por segundo (rad/s).

Al relacionar variables angulares y lineales se deduce que:

$$V (m/s) = r (m) \times \omega (rad/s) \quad [11]$$

Donde  $r$  es el radio; y  $V$  la velocidad lineal o tangencial.

### **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. Análisis dimensional**

#### **3.1.1. Diseño de canal, transición, tanque de circulación y cono de descarga**

La eficiencia de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional radica, principalmente, en la formación óptima del vórtice gravitacional hidráulico. En los últimos tres años, han sido varias las investigaciones relacionadas a la optimización de este tipo de centrales, con el fin de mejorar, aún más, su eficiencia. Para efectos de la presente investigación, se han considerado varias relaciones y recomendaciones de diseño, a fin de contar con un punto de partida fundamentado experimentalmente. A continuación se exponen algunas de las conclusiones principales derivadas de investigaciones previas:

- La máxima eficiencia en la formación del vórtice ocurre con la razón diámetro de orificio de salida / diámetro de tanque de circulación ( $d/D$ ) de 14% -18% para bajas y altas diferencias de carga (en un tramo de cauce) respectivamente (Mulligan & Hull, 2010).
- Desde una perspectiva práctica, el tanque de circulación debe tener un fondo cónico, para facilitar la descarga y a su vez evitar una recirculación en el flujo por efecto de la capa de Ekman (Torres, 2012).
- Los mayores valores de velocidad angular ocurren con la razón base de la entrada al tanque de circulación / diámetro del orificio de salida ( $be/d$ ) de 0.52 (Torres, 2012).

#### **Diseño de tanque de circulación y cono de descarga.**

El diseño de los componentes de la micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional, fue fundamentado en las conclusiones derivadas de previas investigaciones y en las dimensiones de los componentes de la planta energética de vórtice gravitacional hidráulico de Zotlöterer. (Zotlöterer, 2014)

La planta energética de vórtice gravitacional hidráulico de Zotlöterer es una central piloto diseñada y construida por el Ingeniero austriaco Franz Zotlöterer. En base a esta planta piloto se ha adoptado un diámetro de 5.50 metros y una altura de 1.50 metros para el tanque de circulación de la presente investigación. Los componentes del tanque de circulación se determinaron a través del siguiente proceso metodológico:

- a. **Determinación del diámetro y altura del tanque de circulación (D y H):** Las dimensiones del diámetro y altura del tanque de circulación son las mismas de la planta piloto de Franz Zotlöterer. Estas dimensiones son:

$$\text{Diámetro (D)} = 5.50 \text{ m}$$

$$\text{Altura (H)} = 1.50 \text{ m}$$

- b. **Determinación del diámetro del orificio de descarga (d):** Al considerar la razón diámetro de orificio de salida / diámetro de tanque de circulación ( $d/D$ ) de 14%, se busca comprobar la eficiencia del sistema para bajas cargas hidráulicas, dicho esto, el diámetro del orificio de descarga fue determinado de la siguiente manera:

$$\frac{d}{D} = 0.14 \quad [12]$$

Al despejar se obtuvo:

$$d = 0.14 \times D$$

Se reemplazó el valor del diámetro del tanque de circulación:

$$d = 0.14 \times 5.5 \text{ m} = 0.77 \text{ m}$$

Para facilidades constructivas se adoptó un valor de 0.80 metros, por tanto:

$$d = 0.80 \text{ m}$$

- c. **Determinación de la base de la entrada al tanque de circulación (be):** Con fundamento en que los mayores valores de velocidad angular del vórtice de agua ocurren con la razón base de la entrada al tanque de circulación / diámetro del orificio de salida ( $be/d$ ) de 0.52, la base de la entrada al tanque de circulación ( $be$ ) fue determinada de la siguiente manera:

$$\frac{be}{d} = 0.52 \quad [13]$$



Al despejar se obtuvo:

$$be = 0.52 \times d$$

Se reemplazó el valor del diámetro del orificio de descarga:

$$be = 0.52 \times 0.8m = 0.42 m$$

Para facilidades constructivas se adoptó un valor de 0.5 m, por tanto:

$$be = 0.50 m$$

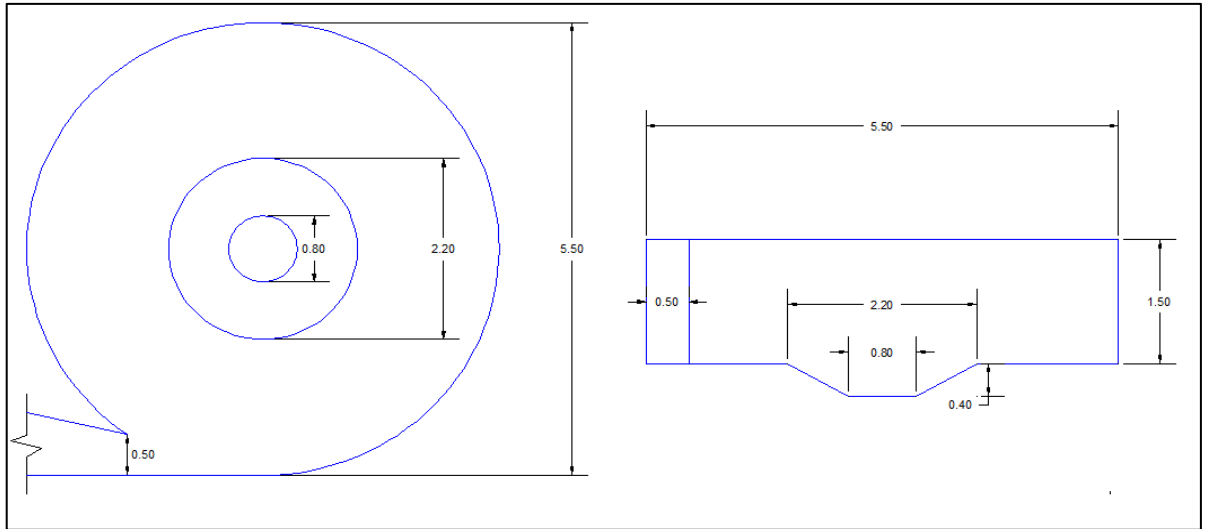
- d. Determinación de las dimensiones del cono de descarga:** Para facilitar la descarga y a su vez evitar una recirculación en el flujo, por efecto de la capa de Ekman, es necesario que uno de los componentes del tanque de circulación sea un cono de descarga. Debido a que no se cuenta con un antecedente investigativo de la razón diámetro mayor de cono de descarga / diámetro de tanque de circulación ( $d_v/D$ ) se asumió que un diámetro conveniente para la investigación es el de 2.20 metros. La altura del cono, de igual manera, fue asumida, y su magnitud es de 0.40 metros.

A continuación se presenta una tabla resumen de las dimensiones de los componentes del tanque de circulación, las mismas se representan en la Figura 13.

**Tabla 2. Características geométricas del tanque de circulación**

<b>Características geométricas del tanque de circulación</b>	
Diámetro del tanque (D)	5.50 m
Diámetro del orificio de descarga (d)	0.80 m
Altura del tanque (H)	1.50 m
Base de la entrada al tanque de circulación (be)	0.50 m
Diámetro mayor de cono de descarga ( $d_v$ )	2.20 m
Altura de cono ( $H_c$ )	0.40 m

**Fuente:** Los autores.



**Figura 13. Características geométricas de tanque de circulación**

**Fuente:** Los autores.

### **Diseño de canal y transición**

El ingreso tangencial del agua al tanque de circulación es uno de los factores más importantes en una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional. Un ingreso controlado y sin turbulencias considerables garantiza la correcta formación del vórtice de agua, y por tanto, beneficia a la eficiencia del sistema. Por este motivo el correcto diseño del canal es un factor preponderante en este tipo de centrales.

Como se mencionó en el apartado 2.6.1 las variables a considerar en el proceso de diseño son: el tipo de material que conformará el canal, la velocidad mínima permisible, la pendiente del fondo del canal y las pendientes laterales, el borde libre y la sección más óptima ya sea determinada hidráulica o empíricamente. En el caso en estudio las variables consideradas son:

- El material es concreto, cuyo coeficiente de rugosidad es de 0.014.
- Por tratarse de un sistema para bajas cargas hidráulicas, la velocidad de diseño debe ser relativamente baja. La velocidad adoptada es de 0.90 m/s.
- Se adoptó una sección rectangular, ya que ésta proporciona las características adecuadas para el sistema.

- Las características geométricas del canal fueron diseñadas para un caudal de  $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$  (Caudal con el que opera la planta piloto de Franz Zotlöterer).

A continuación se describe el proceso de diseño:

- Según la ecuación [4]:  $Q = A \times V$ ; conocidos los valores de caudal y velocidad se determinó la magnitud del área de la sección:

$$Q = A \times V \quad [4]$$

Al despejar se obtuvo:

$$A = \frac{Q}{V}$$

Se reemplazó los valores de caudal y velocidad:

$$A = \frac{1.00 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.90 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1.11 \text{ m}^2$$

El valor del área es de  $1.11 \text{ m}^2$

- Según la Tabla 1: El área óptima para un canal de sección rectangular es  $2 \times y^2$ , por tanto:

$$A = 2 \times y^2$$

Al despejar se obtuvo:

$$y = \sqrt{\frac{A}{2}}$$

Se reemplazó el valor de área:

$$y = \sqrt{\frac{A}{2}} = \sqrt{\frac{1.11}{2.00}} = 0.74 \text{ m}$$

Por tanto el tirante óptimo de operación del sistema tiene una magnitud de 0.74 metros; como:

$$A = b \times y$$

Entonces, al despejar y remplazar el valor de tirante, se obtuvo:

$$b = \frac{A}{y} = \frac{1.11m^2}{0.74m} = 1.50 m$$

Por ende, la base del canal tiene una sección de 1.50 m.

- Según la ecuación [3]:

$$A \times R^{\frac{2}{3}} = \frac{n \times Q}{\sqrt{S}} \quad [3]$$

Conocidos los valores de tirante, base, área, rugosidad, caudal y según la Tabla 1.  $R = y/2$ , se despejó la ecuación y se remplazó los datos para obtener el valor de la pendiente de la base, así:

$$S = \left( \frac{Q \times n}{A \times R^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = \left( \frac{1 \frac{m^3}{s} \times 0.014}{1.11m^2 \times \left( \frac{0.74m}{2} \right)^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = 0.0006 \frac{m}{m}$$

De esta manera, se determinó que la pendiente longitudinal del canal es de 0.0006 m/m.

- Conocida la base de entrada al tanque de circulación, fue necesario incorporar al diseño una transición, que permita que el ingreso tangencial del agua cumpla los parámetros geométricos de dicho tanque. Por tanto se hizo uso de la ecuación [2] como se muestra a continuación:

$$L = \frac{b1 - b2}{2xtg(12.5)} \quad [2]$$

Se reemplazó los valores  $b_1$  y  $b_2$ , y se obtuvo la longitud óptima de la transición:

$$L = \frac{1.50m - 0.5m}{\text{tg}(12.5)} = 4.51 \text{ m}$$

Para facilidades constructivas se adopta un valor de 4.50 m, por tanto:

$$L = 4.50 \text{ m}$$

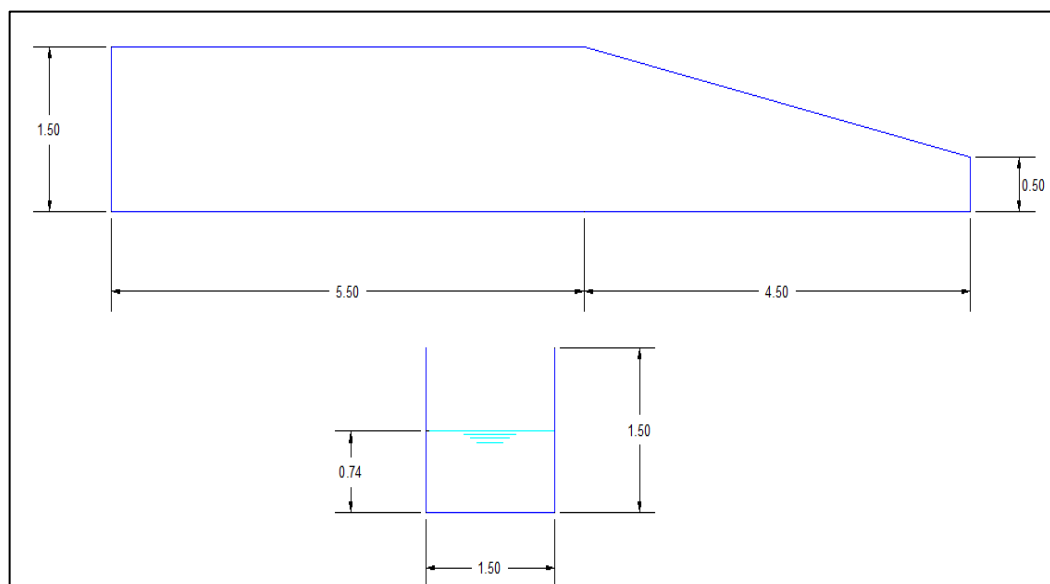
- Se adoptó una altura de 1.50 m para el canal, para cubrir el requerimiento de borde libre y a la vez tener continuidad de altura con el tanque de circulación. De igual manera, para efectos de la presente investigación se adoptó una longitud del canal previo a la transición de 5.50 m.

A continuación se presenta una tabla resumen de las dimensiones del canal y de la transición, las mismas se representan en la Figura 14.

**Tabla 3. Características geométricas del canal y transición**

Características geométricas del canal y transición	
Base del canal (b)	1.50 m
Tirante de agua (y)	0.74 m
Altura canal (Hb)	1.50 m
Pendiente Longitudinal (S)	0.0006 m/m
Longitud de transición (L)	4.50 m

Fuente: Los autores.

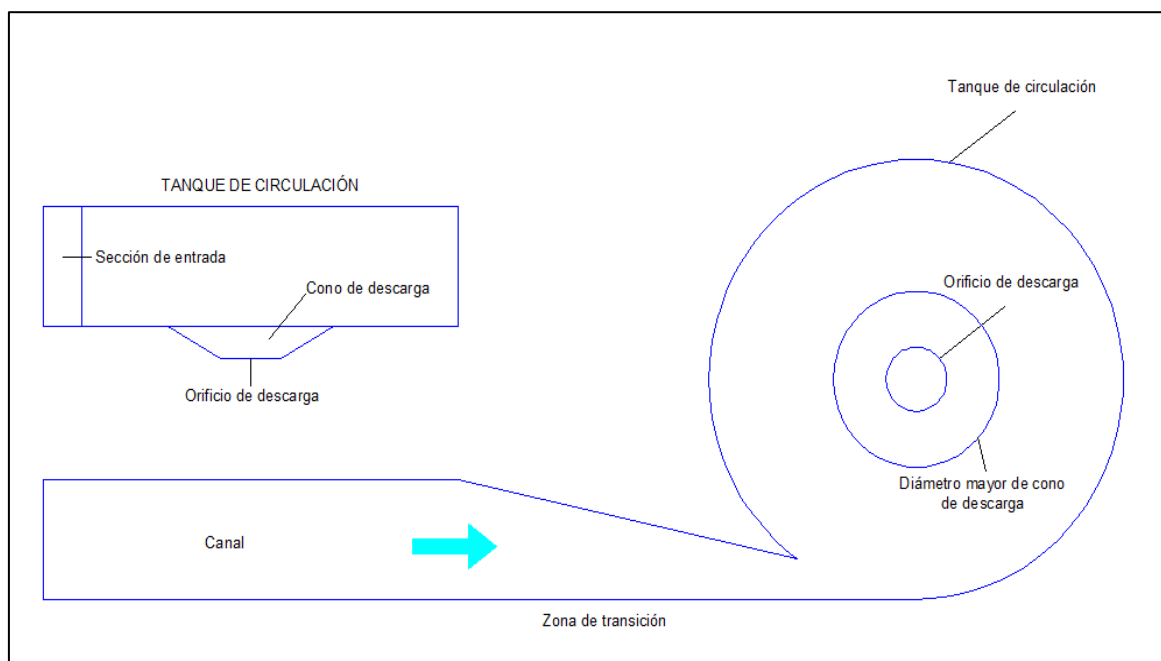


**Figura 14. Características geométricas del canal y transición**

Fuente: Los autores

## Representación gráfica de los componentes de la micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional.

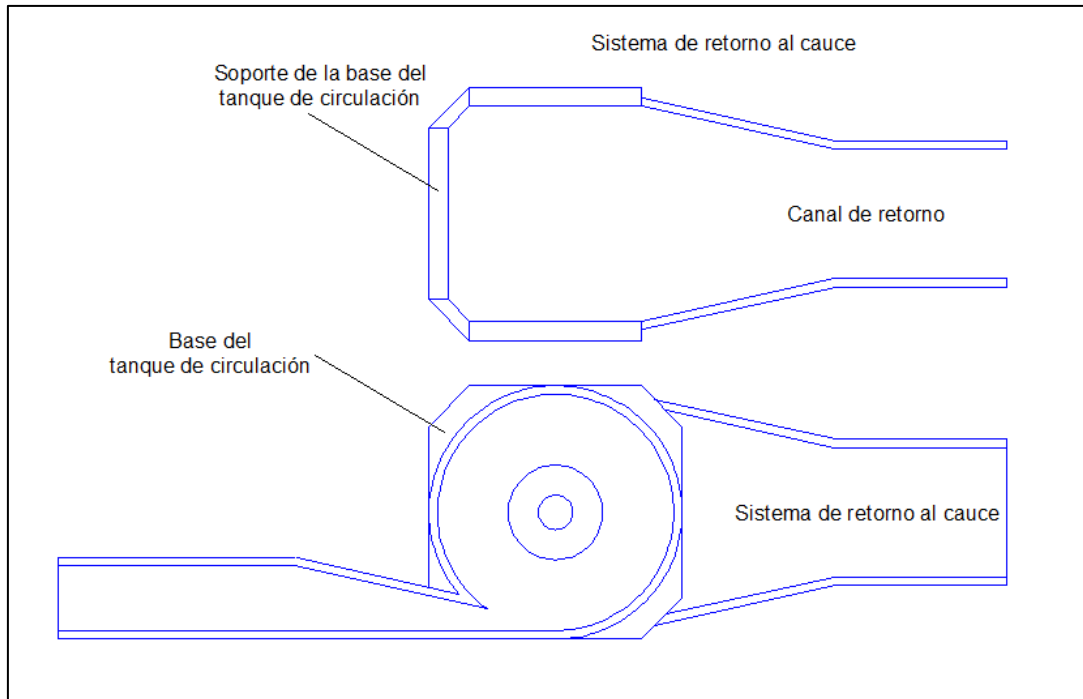
En las Figuras 15 y 16 se representa las características geométricas del canal, transición y tanque de circulación (de la micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional) diseñadas en los apartados anteriores.



**Figura 15. Representación gráfica de las secciones geométricas de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional**

**Fuente:** Los autores.

Como complemento al diseño de los elementos, se agregó el inicio del sistema de retorno al cauce, además se adoptó un espesor de 0.20 metros para la mayoría de los componentes de la estructura. A continuación, fundamentados en el diseño realizado, se muestra la estructura hidráulica necesaria para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional



**Figura 16. Estructura hidráulica para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional**

**Fuente:** Los autores.

Posterior al diseño se realizó la representación tridimensional de los elementos del sistema como se muestra en las figuras 17, 18, 19 y 20:



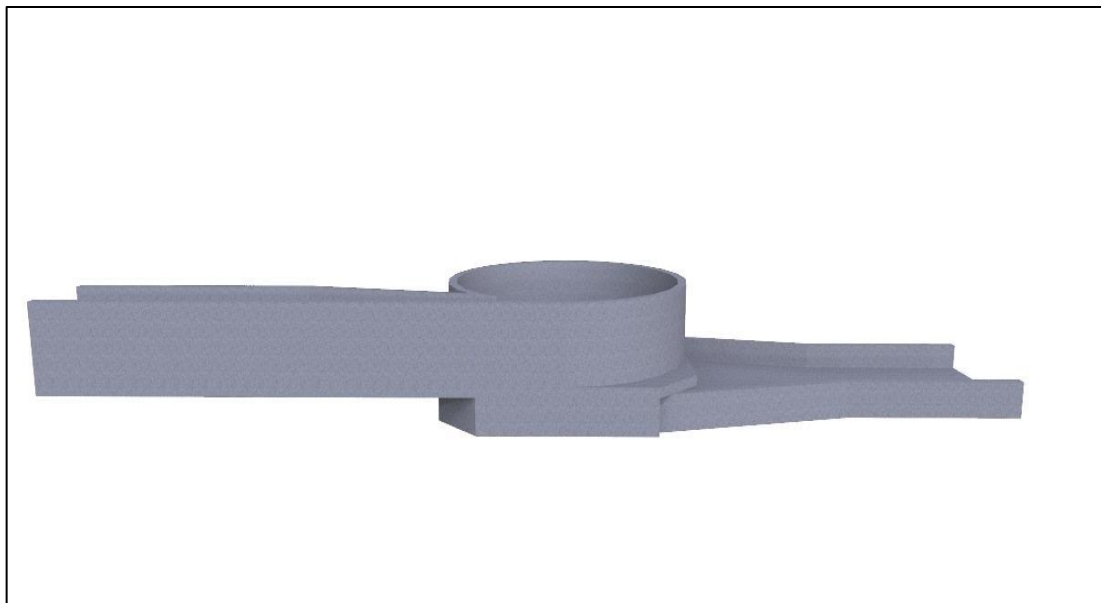
**Figura 17. Perspectiva número uno de la vista tridimensional de la estructura hidráulica para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 18. Perspectiva número dos de la vista tridimensional de la estructura hidráulica para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional**

**Fuente:** Los autores

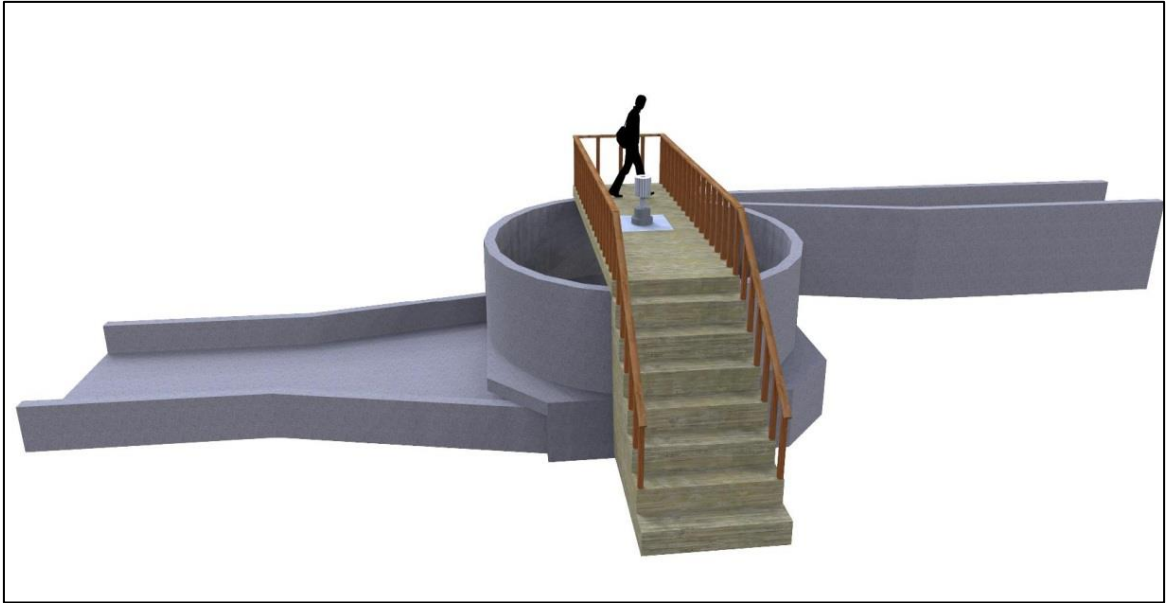


**Figura 19. Perspectiva número tres de la vista tridimensional de la estructura hidráulica para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional**

**Fuente:** Los autores.

Como parte del sistema se debe incluir el módulo de generación, y su acceso, el cual posee un estimativo gráfico como el que se muestra en la Figura 20.





**Figura 20. Representación gráfica del módulo de generación con acceso para mantenimiento**

**Fuente:** Los autores.

Como complemento gráfico al diseño de la estructura hidráulica del sistema presentado, la Figura 21 muestra una perspectiva en campo de la estructura:



**Figura 21. Perspectiva en campo de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional**

**Fuente:** Los autores.

### 3.1.2. Diseño a escala de estructura hidráulica para la implementación de una micro-central hidroeléctrica basada en vórtice gravitacional

Luego de haber obtenido las dimensiones de los componentes de la estructura hidráulica de la micro-central, se procedió a dimensionar un modelo a escala de la misma, con el fin de realizar ensayos en laboratorio para comprobar la funcionalidad del sistema diseñado.

La escala utilizada para la reducción de los elementos de la estructura es 1:5. De esta manera se obtuvo un sistema de dimensiones geométricas asequibles para la experimentación en laboratorio. A continuación se presenta las tablas resumen de las dimensiones de la estructura, como también la representación gráfica de las mismas:

**Tabla 4. Características geométricas de tanque de circulación a escala**

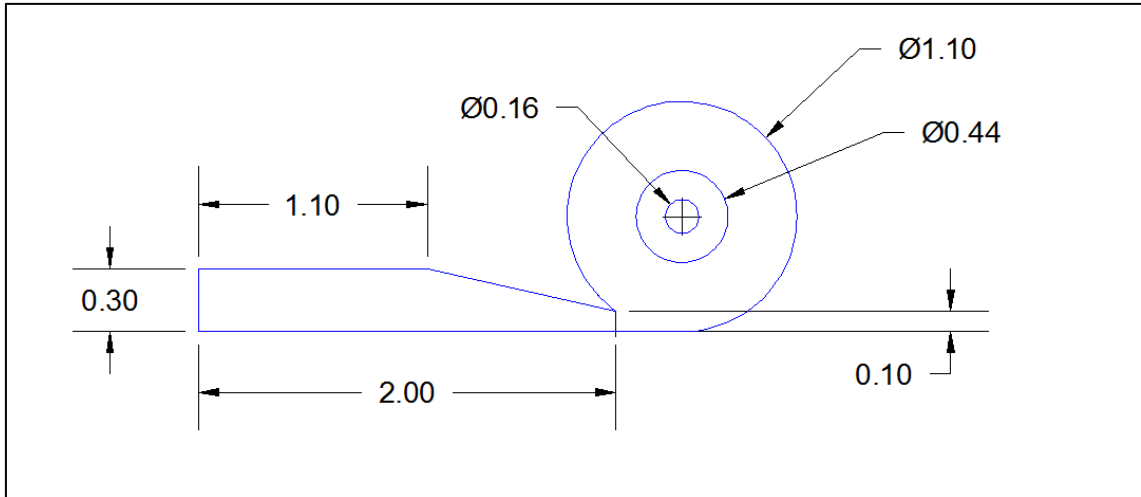
<b>Características geométricas de tanque de circulación a escala</b>	
Diámetro del tanque (D)	1.10 m
Diámetro del orificio de descarga (d)	0.16 m
Altura del tanque (H)	0.30 m
Base de la entrada al tanque de circulación (be)	0.10 m
Diámetro mayor de cono de descarga (dv)	0.44 m
Altura de cono (Hc)	0.08 m

**Fuente:** Los autores.

**Tabla 5. Características geométricas de canal y transición**

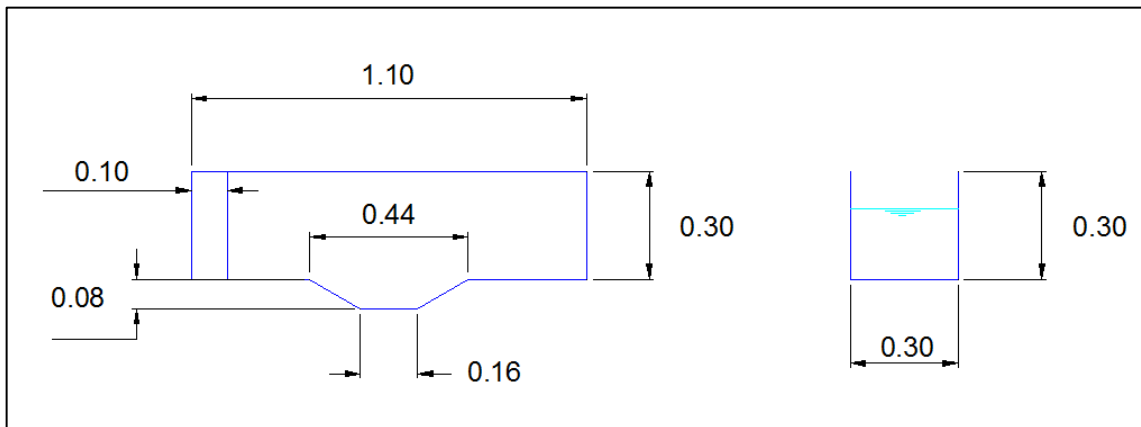
<b>Características geométricas de canal y transición</b>	
Base del canal (b)	0.30 m
Altura canal (Hb)	0.30 m
Longitud del canal (Lc)	1.10 m
Longitud de transición (L)	0.90 m

**Fuente:** Los autores.



**Figura 22. Vista en planta de las características geométricas del canal y tanque de circulación del sistema a escala para laboratorio**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 23. Vista de las secciones transversales del tanque de circulación y canal del sistema a escala para laboratorio**

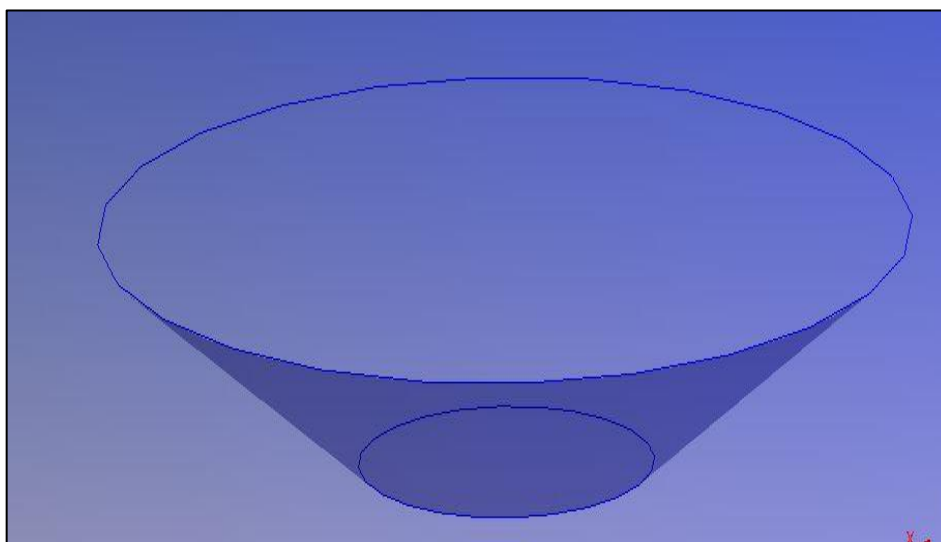
**Fuente:** Los autores.

Para efectos de experimentación, surgió el requerimiento de comprobar los efectos en la formación del vórtice hidráulico como producto de la implementación del cono de descarga. Por esta razón se diseñó un grupo de tres conos cambiables para la estructura de laboratorio, la diferencia entre ellos es el diámetro mayor. A continuación la Tabla 6 presenta de las dimensiones de cada cono.

**Tabla 6. Dimensiones de conos de descarga para modelo experimental**

<b>Dimensiones de conos de descarga para modelo experimental</b>		
<b>Cono número uno</b>		
Diámetro mayor	0.44	m
Diámetro menor	0.16	m
Altura	0.08	m
<b>Cono número dos</b>		
Diámetro mayor	0.24	m
Diámetro menor	0.16	m
Altura	0.08	m
<b>Cono número tres</b>		
Diámetro mayor	0.60	m
Diámetro menor	0.16	m
Altura	0.08	m

Fuente: Los autores



**Figura 24. Esquema general cono de descarga**

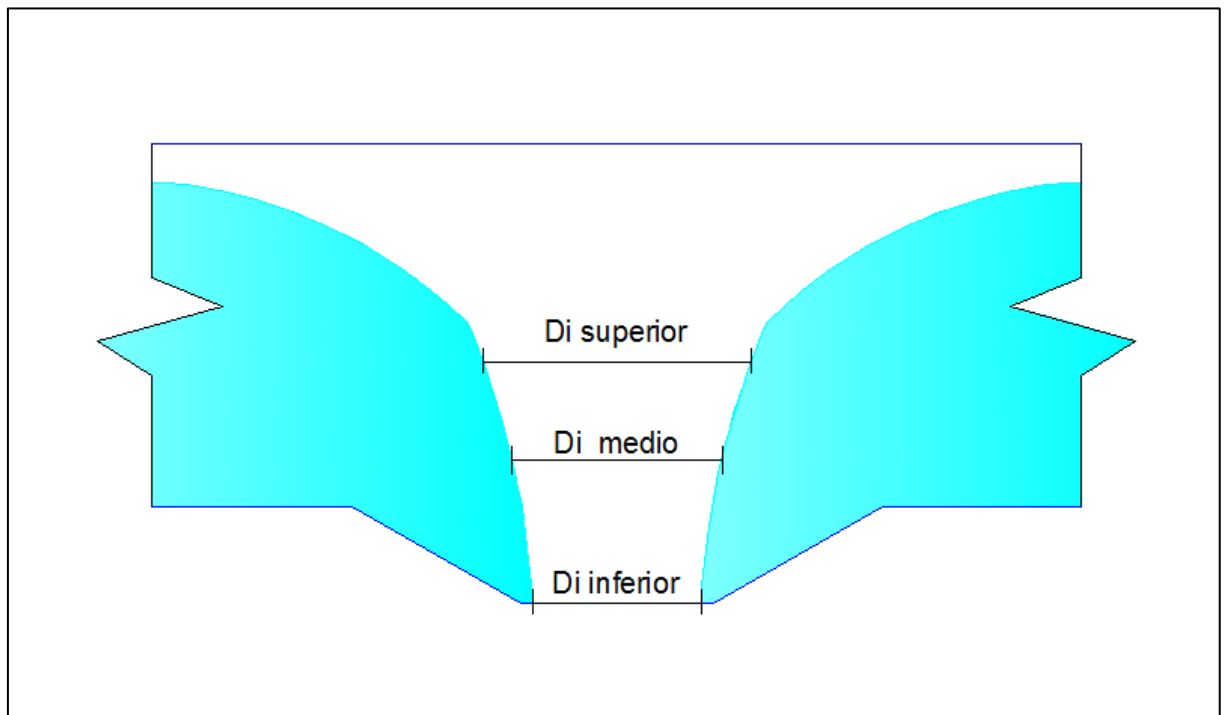
Fuente: Los autores.

### **Caracterización de turbinas y módulo de transmisión**

Como parte del estudio de la eficiencia del sistema de generación eléctrica basado en vórtice gravitacional se planteó la fabricación de un grupo de turbinas, dos en un principio y posteriormente, se integró un nuevo prototipo para experimentación. Las dimensiones, perfiles y curvatura de los álabes de cada turbina fueron adoptados en función de las características del flujo rotacional presentes en el vórtice hidráulico.

Debido a que el objetivo de la presente investigación no es el diseño especializado de turbinas, para el sistema de vórtice gravitacional, no se profundizó en teorías ni metodologías de diseño para el grupo de turbinas.

La principal característica (del vórtice hidráulico) en consideración para la caracterización de las turbinas fue la zona de trabajo de las mismas, para lo cual, se realizó mediciones del que se denominó diámetro interior de vórtice (Di). En la Figura 25 se muestra un esquema del vórtice gravitacional hidráulico, en el que se especifica el diámetro interior:



**Figura 25. Sección de vórtice gravitacional hidráulico**

**Fuente:** Los autores.

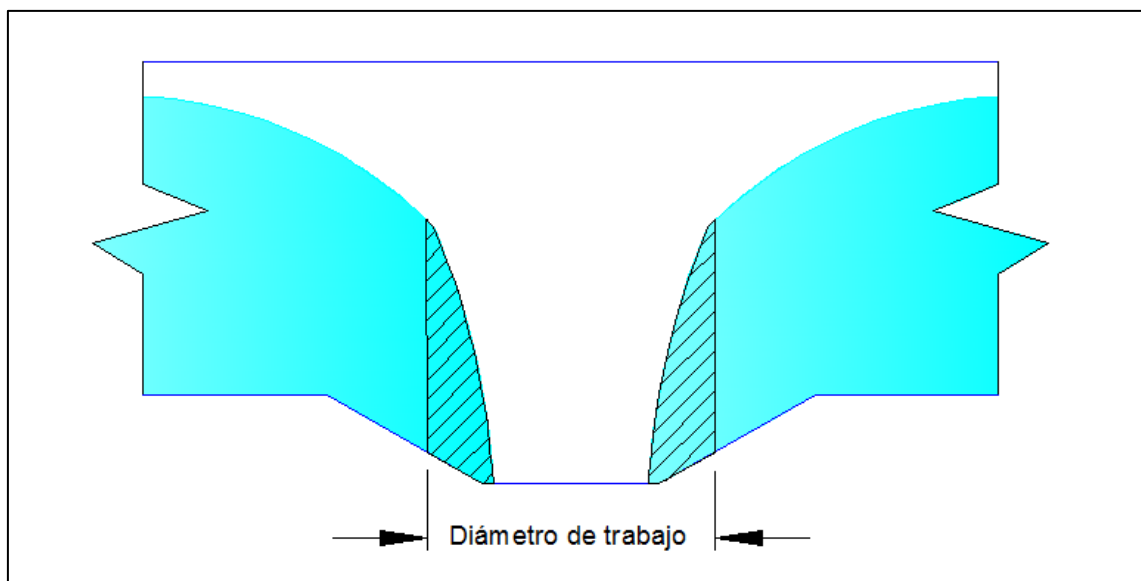
Debido a que la dimensión del diámetro interior varía función de la altura a la que sea medida, se realizó la toma de datos de tres diámetros en alturas diferentes. Estos diámetros se denominaron: diámetro superior, diámetro medio y diámetro inferior. El diámetro superior fue medido a una altura, con respecto de la base del tanque, de 20 centímetros; el diámetro medio a 12 centímetros, de la misma base; y el diámetro inferior directamente en el orificio de descarga. Se realizó una serie de mediciones con cada uno de los conos de descarga del sistema a escala. A continuación se presenta una tabla resumen de las magnitudes promedio de cada diámetro a diferente altura:

**Tabla 7. Promedio de medición de diámetro interior de vórtice (Di) a diferentes alturas**

Promedio de medición de diámetro interior de vórtice (Di) a diferentes alturas.		
Diámetro superior	0.32	m
Diámetro medio	0.21	m
Diámetro inferior	0.14	m

**Fuente:** Los autores.

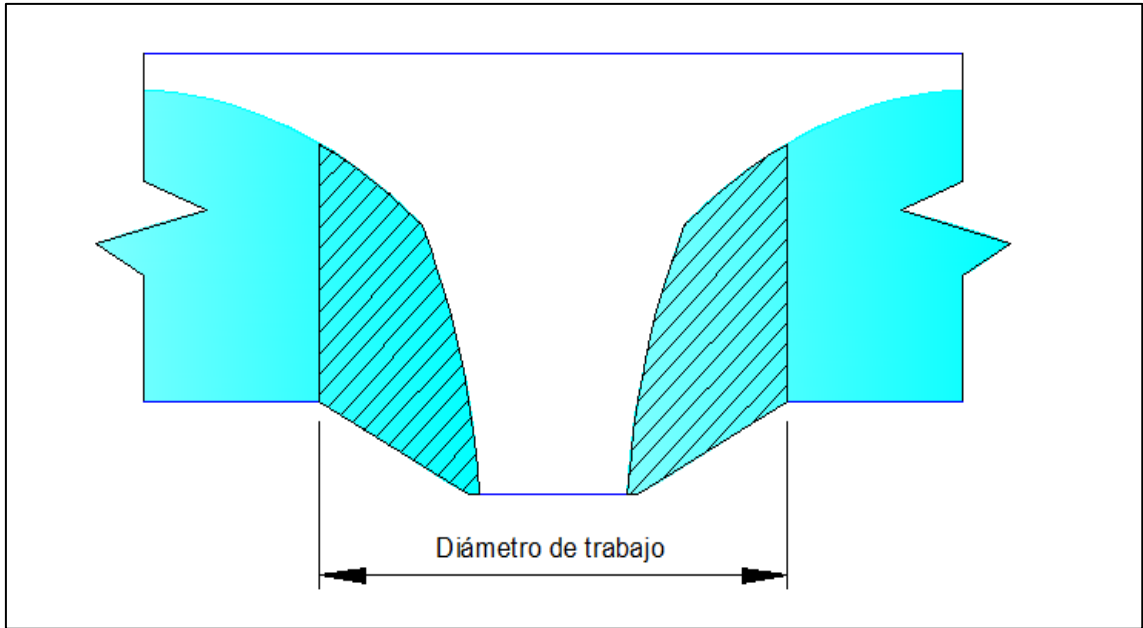
Como punto de partida en la investigación, se asumió que un diámetro conveniente de trabajo, para las turbinas uno y dos, es 26 cm. En la Figura 26 se representa el diámetro mencionado:



**Figura 26. Diámetro de trabajo de turbinas uno y dos**

**Fuente:** Los autores.

Por otro lado, la turbina número tres, fue diseñada con un diámetro de trabajo de 44 cm.



**Figura 27. Diámetro de trabajo de turbina tres**

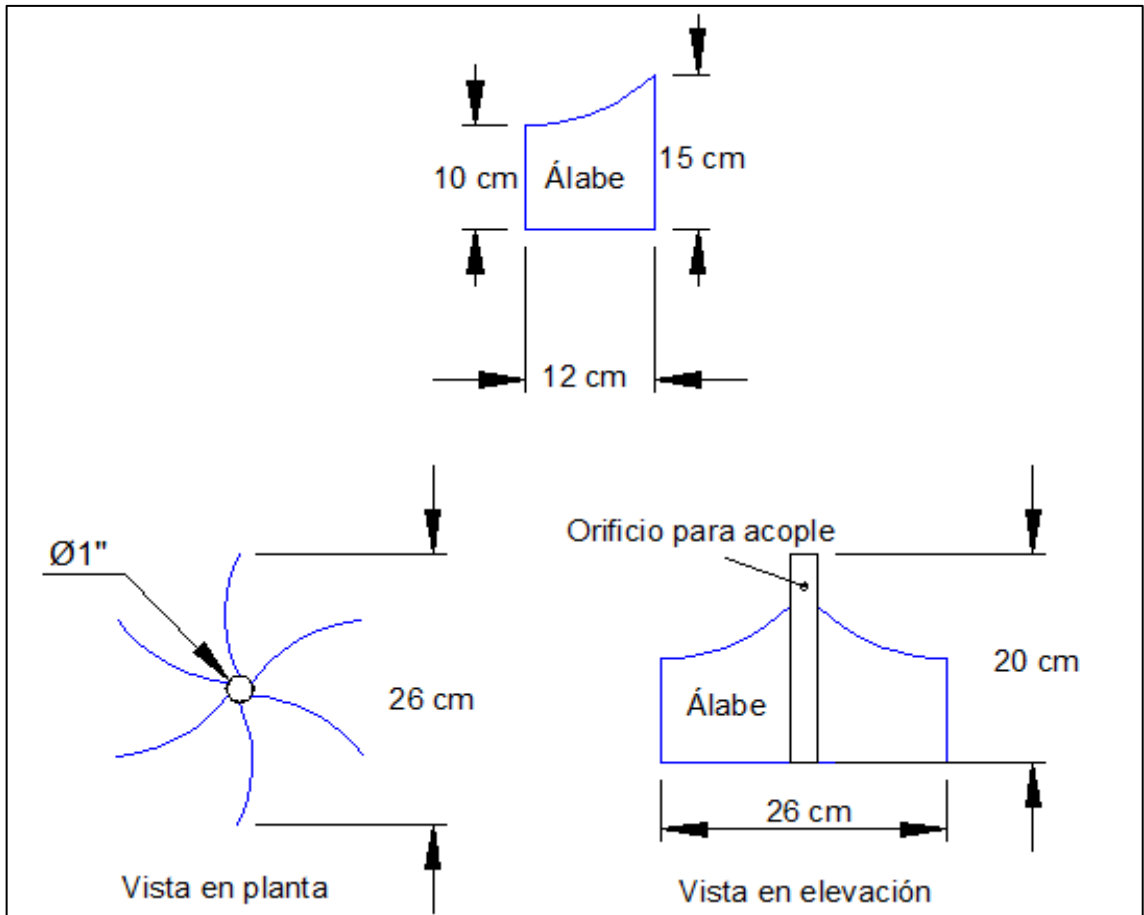
**Fuente:** Los autores.

En cada turbina, de la presente investigación, se puede diferenciar dos componentes principales:

- **Eje central:** Se trata de un eje circular hueco adaptable, de dimensiones comunes para todo el grupo de turbinas.
- **Grupo de álabes:** El perfil, curvatura y dimensiones de los álabes varían en cada prototipo diseñado.

A continuación se presenta las características y dimensiones de las turbinas diseñadas:

La **turbina número uno** posee 6 álabes cóncavos, separados  $60^\circ$  uno de otro. En la Figura 28 se muestra las dimensiones y perfil de los álabes, así como la representación gráfica de esta turbina.

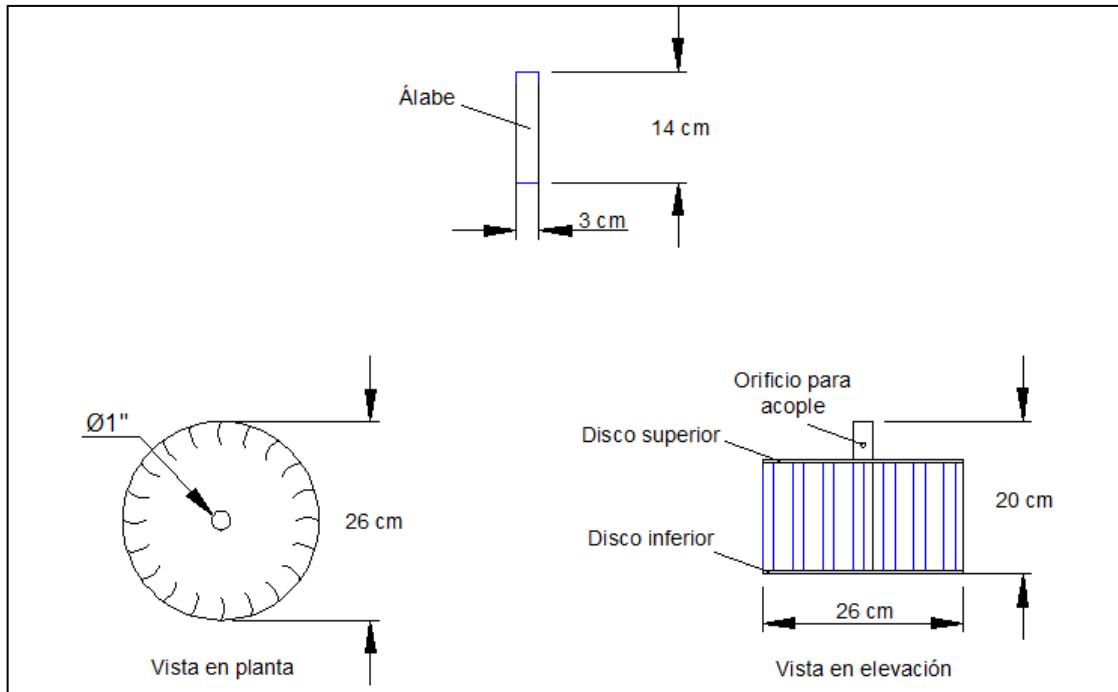


**Figura 28. Características turbina número uno**

**Fuente:** Los autores.

La **turbina número dos** posee 20 álabes cóncavos, separados  $18^\circ$  uno de otro, unidos al eje central a través de dos discos, ubicados en la parte superior e inferior del grupo de álabes. En la Figura 29 se muestra las dimensiones y perfil de los álabes, así como la representación gráfica de esta turbina.

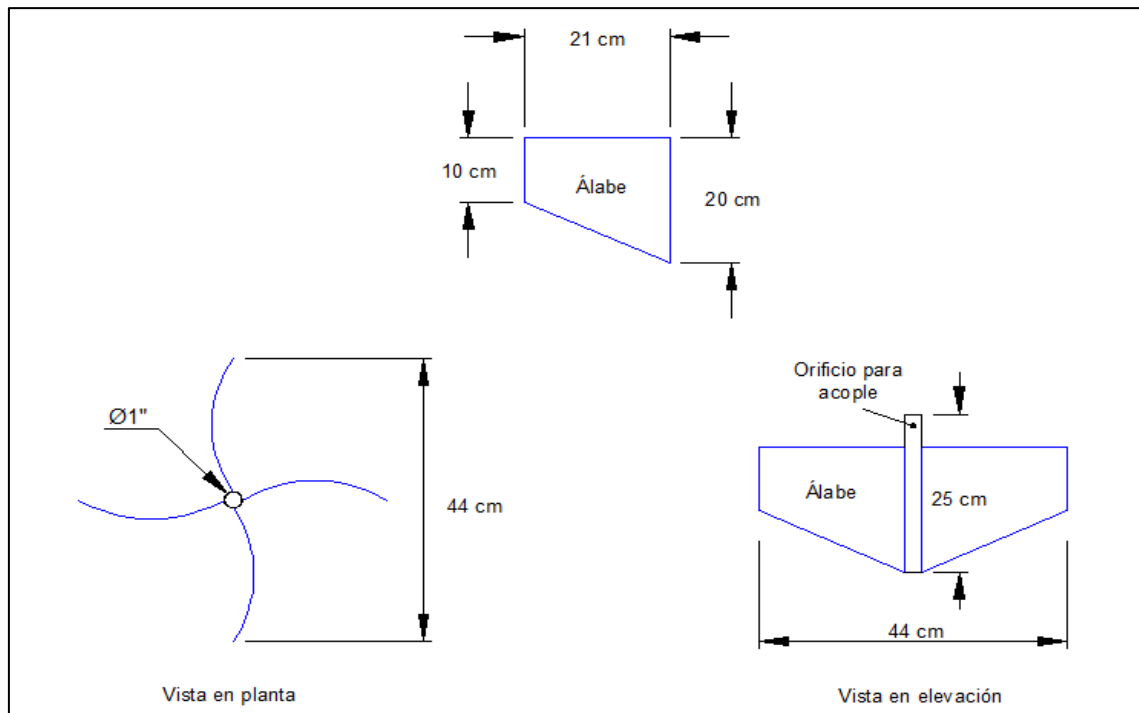




**Figura 29. Características turbina número dos**

**Fuente:** Los autores.

La **turbina número tres** posee 4 álabes cóncavos, separados  $90^\circ$  uno de otro. En la Figura 30 se muestra las dimensiones y perfil de los álabes, así como la representación gráfica de esta turbina:



**Figura 30. Características turbina número tres**

**Fuente:** Los autores.

Las turbinas uno y dos, poseen el mismo diámetro de trabajo, pero con diferente configuración de forma, mientras que en la turbina número uno cada uno de los álabes tiene conexión directa con el eje central, en la turbina dos, el grupo de álabes se conecta al eje central a través de dos discos situados en la parte superior e inferior.

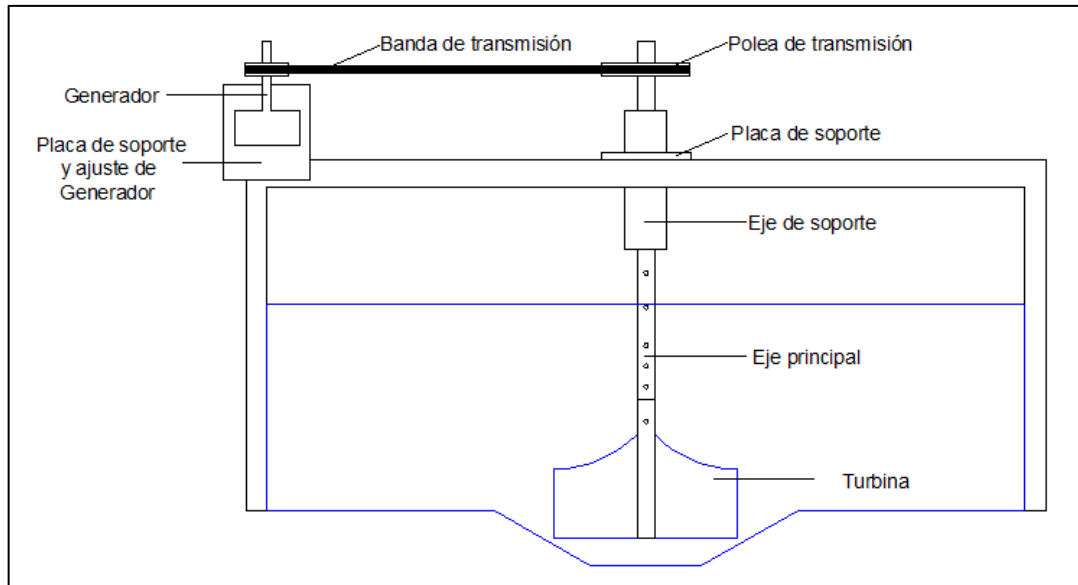
Estas configuraciones se deben a que se planteó la interrogante de cómo afectaría la longitud horizontal del álabe al desempeño de la turbina. Al ser el centro del vórtice libre de agua, gran parte de la sección de cada álabe de la turbina número uno, no sería aprovechado, y de esta manera surgió el modelo para la turbina número dos.

Luego del estudio y experimentación del sistema, a través de uso de las turbinas uno y dos, se planteó la caracterización y construcción de un nuevo prototipo de turbina. La fabricación de la turbina número tres, surge ante la necesidad de mejorar la eficiencia del sistema de generación. Se planteó la hipótesis de que un mayor diámetro de trabajo y una mayor área de impacto (entendida como el área de choque entre el agua y el álabe) incrementarían la potencia del sistema de vórtice gravitacional.

Con fundamento en que una turbina hidráulica es una turbomáquina motora que absorbe energía de una corriente fluida, por lo general agua, y restituye energía mecánica, se diseñó un **módulo de transmisión** de energía mecánica, en el que se distinguen los siguientes elementos:

- Eje principal
- Polea de transmisión
- Caja de rodamientos
- Eje de soporte
- Placa de soporte
- Placa de soporte y ajuste de generador
- Banda de transmisión

El módulo transmite la energía mecánica de rotación hacia un generador, el cual la transforma en energía eléctrica.



**Figura 31. Esquema de módulo de transmisión**

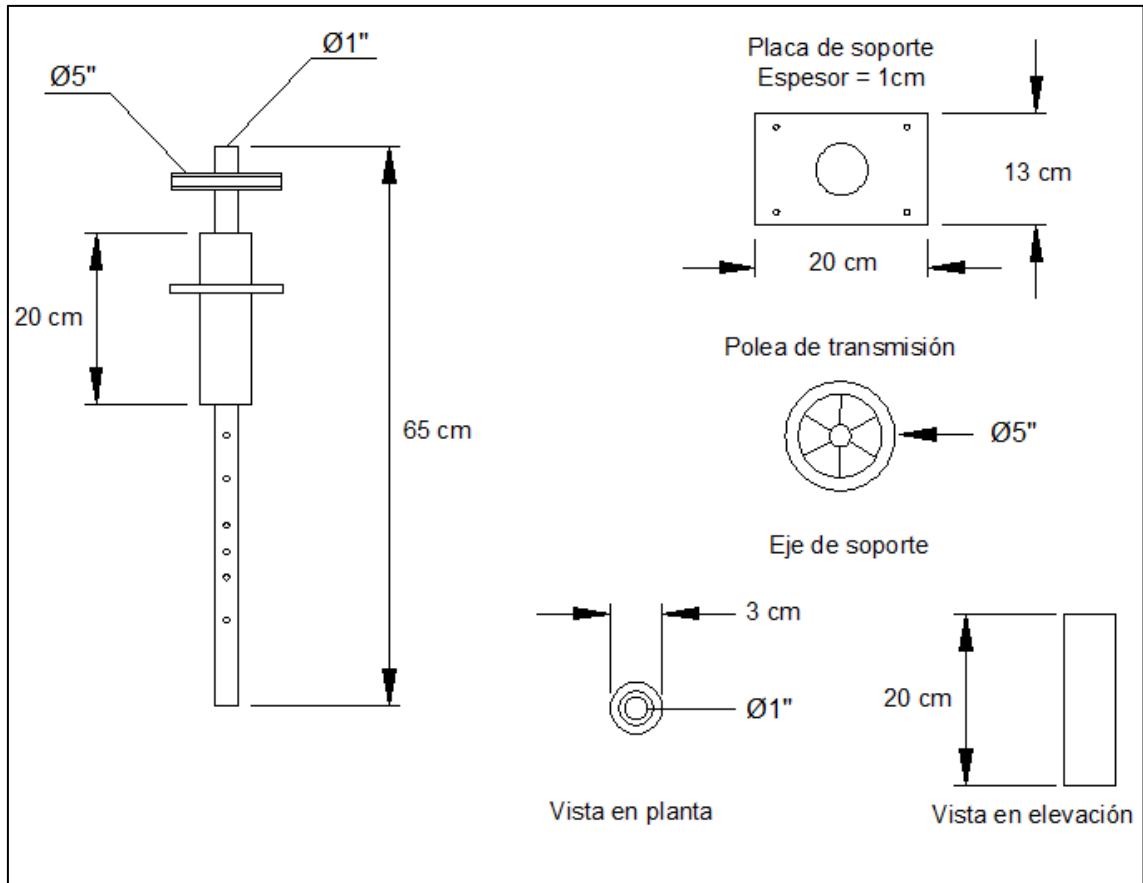
**Fuente:** Los autores.

El **eje principal** es el elemento en donde se acopla los diferentes tipos de turbinas. Por otro lado la **caja de rodamientos** es el elemento que permite fijar el **eje de soporte** a una base fija (la cual se acopla a dos listones metálicos ubicados sobre el tanque de circulación) y a la vez posibilita el giro con mínima restricción del eje principal.

La **caja de rodamientos** está compuesta por:

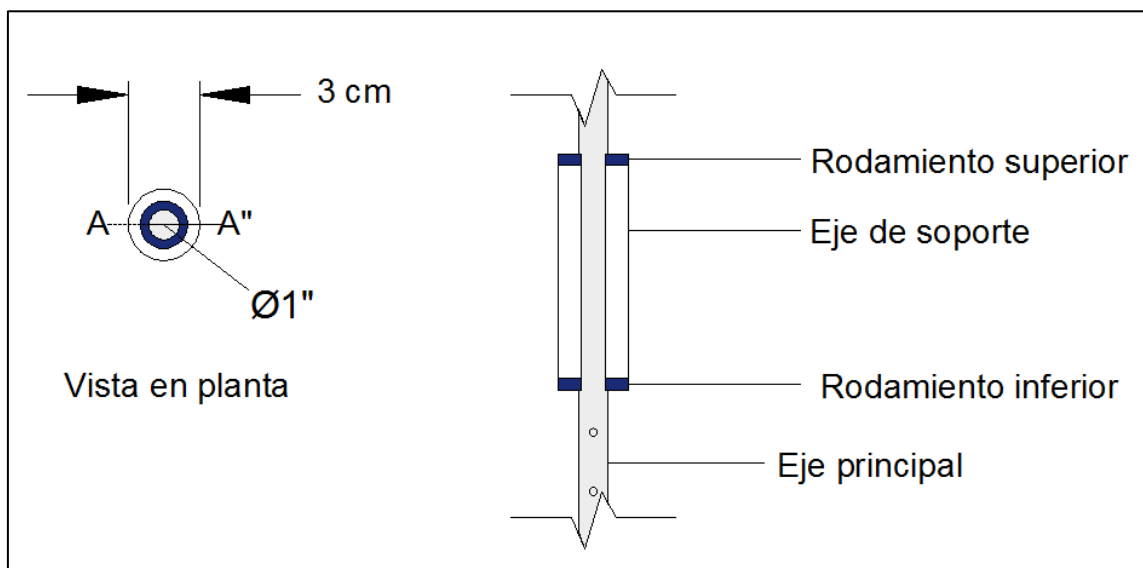
- Eje de soporte
- Rodamiento superior
- Rodamiento inferior

En las figuras siguientes se especifican dimensiones y características geométricas de algunos componentes del módulo de transmisión:



**Figura 32. Dimensiones y características geométricas de componentes del módulo de transmisión**

Fuente: Los autores.



**Figura 33. Características geométricas de la caja de rodamientos**

Fuente: Los autores.



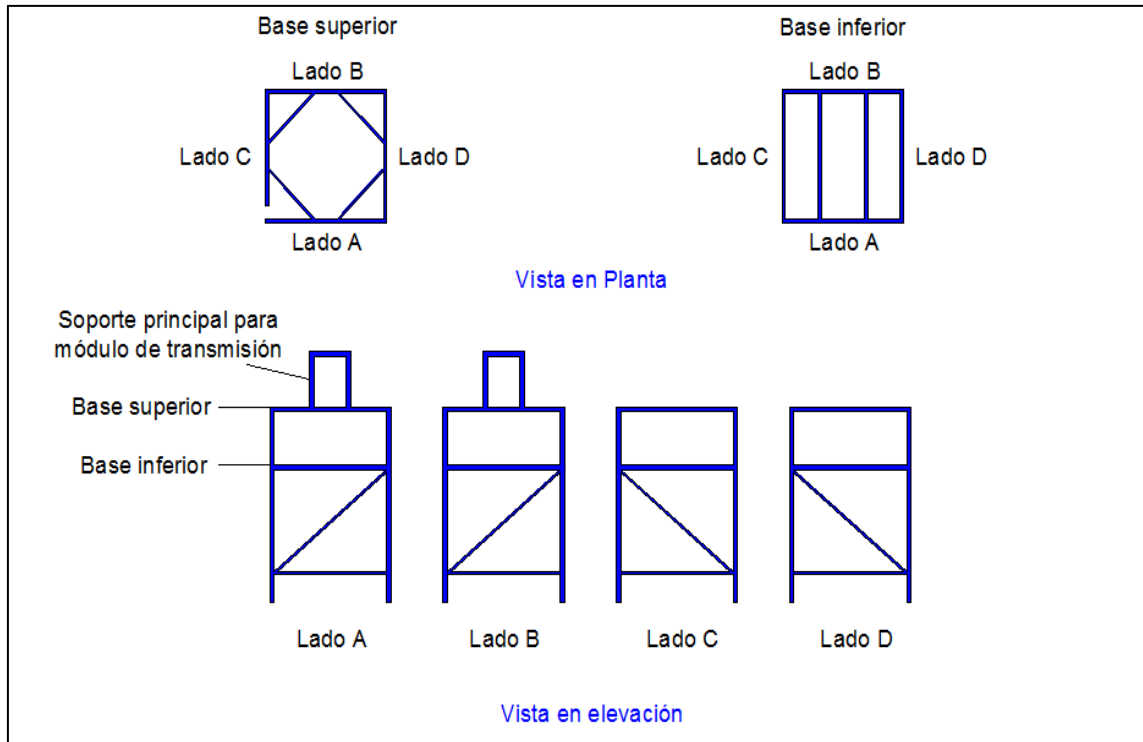
**Figura 34. Referencia de rodamientos**

**Fuente:** <http://xurl.es/jvu0w>

### **Diseño de estructura de soporte y sistema de recirculación**

Como parte del diseño a escala, del sistema de vórtice gravitacional, fue necesaria la implementación de una estructura de soporte para dicho sistema. Las dimensiones de esta estructura se determinaron en función de la altura de acople del sistema, ya que, para obtener los diversos caudales de experimentación, la estructura deriva su entrada de un canal metálico, que forma parte de un banco hidráulico de ensayos, el cual se encuentra presente en uno de los laboratorios del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja.

A continuación se expone las dimensiones y características geométricas de los componentes de la estructura de soporte:



**Figura 35. Elementos constitutivos de estructura de soporte de tanque de circulación**

**Fuente:** Los autores.

La Figura 35 muestra un esquema general de los elementos constitutivos de la estructura de soporte del tanque de circulación. La estructura se compone de seis elementos principales: las bases superior e inferior y los lados A, B, C y D. Asimismo, uno de los elementos que se puede distinguir es el soporte principal para módulo de transmisión. Este componente es la base de dos listones, ubicados sobre el tanque de circulación, los cuales cumplen la función de base para la placa de soporte del módulo.

Las base superior, mostrada en la Figura 35, es el soporte del tanque de circulación del sistema a escala. Por otro lado, la base inferior es el soporte del tanque de desagüe, el cual es el encargado de captar el agua evacuada por el tanque de circulación.

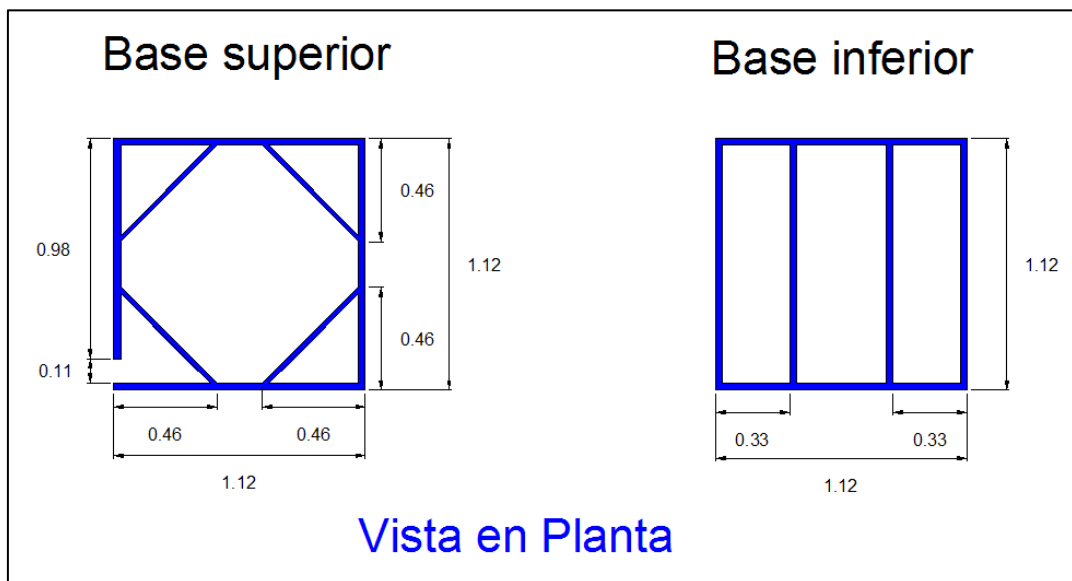
A continuación, en la Figura 36, se ilustra una vista tridimensional de la estructura de soporte del tanque de circulación. Para una mejor visualización se ha omitido algunos elementos.



**Figura 36. Vista tridimensional de estructura de soporte de tanque de circulación**

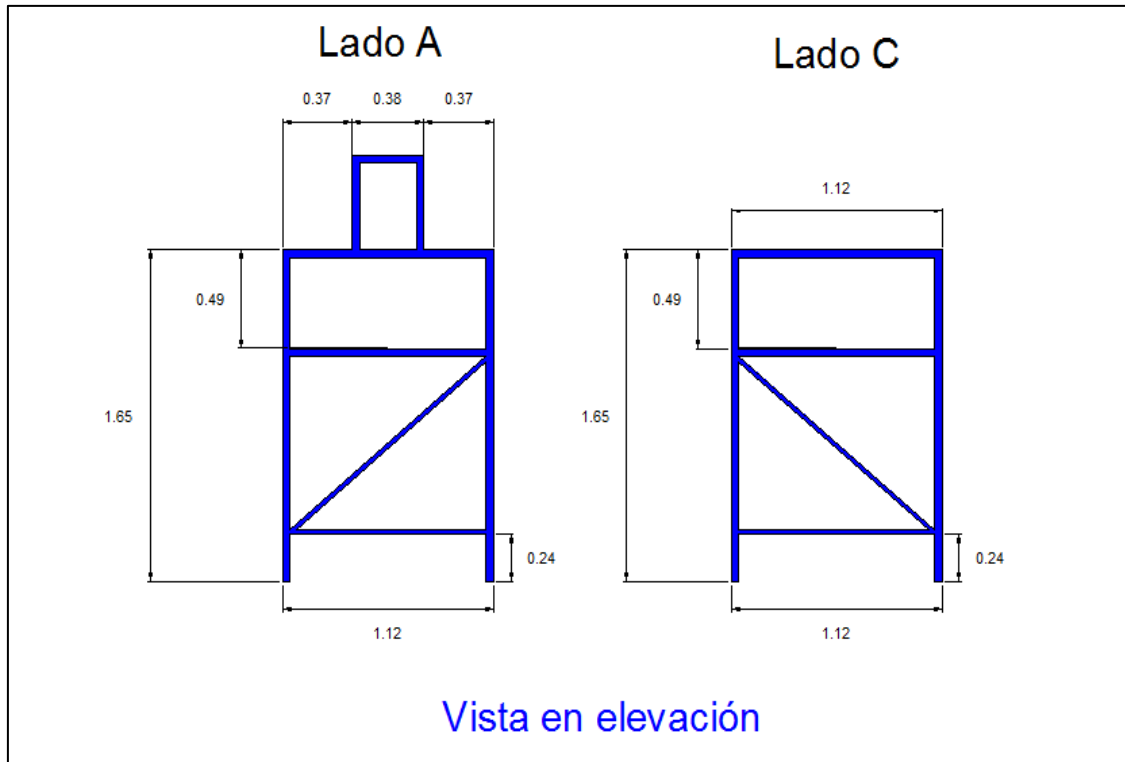
**Fuente:** Los autores.

Las dimensiones de los diferentes componentes de la estructura se muestran en las figuras 37 y 38.



**Figura 37. Vista en planta de estructura de soporte de tanque de circulación**

**Fuente:** Los autores.



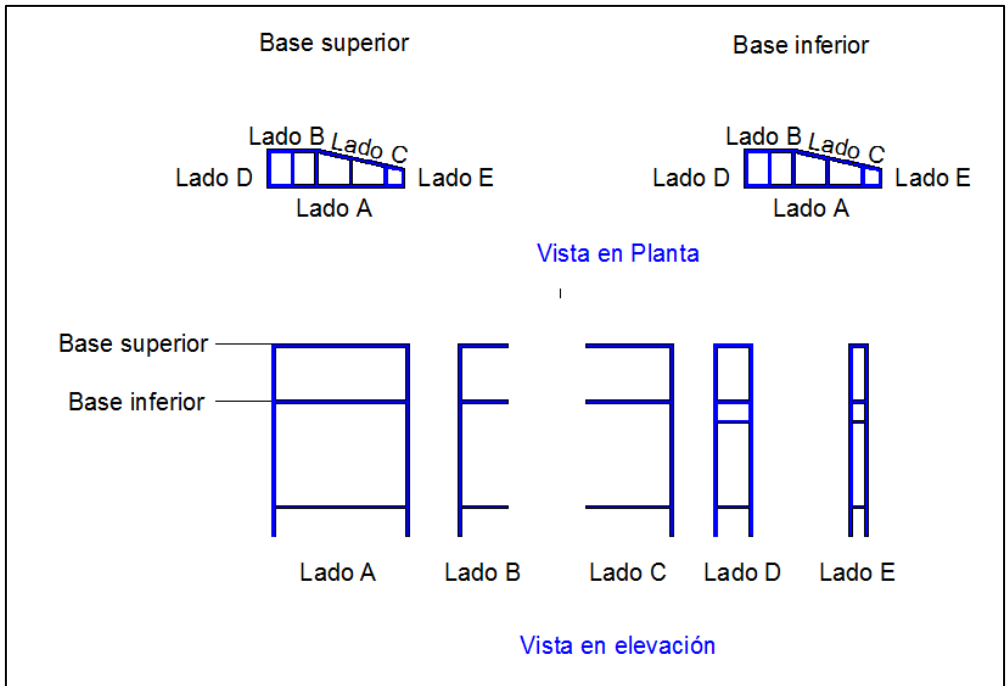
**Figura 38. Vista en elevación de estructura de soporte de tanque de circulación**

**Fuente:** Los autores.

Los lados A y C, son de iguales características a los lados B y D respectivamente.

En las figuras 39 y 40 se expone las dimensiones y características geométricas de la estructura de soporte del canal de entrada al tanque de circulación. Dicha estructura está compuesta de siete elementos principales: las bases superior e inferior y los lados A, B, C, D y E. La base superior es el soporte del canal de entrada al tanque de circulación. Por otro lado, la base inferior es el soporte del canal de recirculación, el cual se encarga de conducir, de regreso, el agua utilizada por el sistema de vórtice gravitacional hacia el depósito principal del banco hidráulico. Este canal se encuentra conectado de forma directa al tanque de desagüe, por lo que se obtiene de esta manera, el denominado sistema de recirculación.

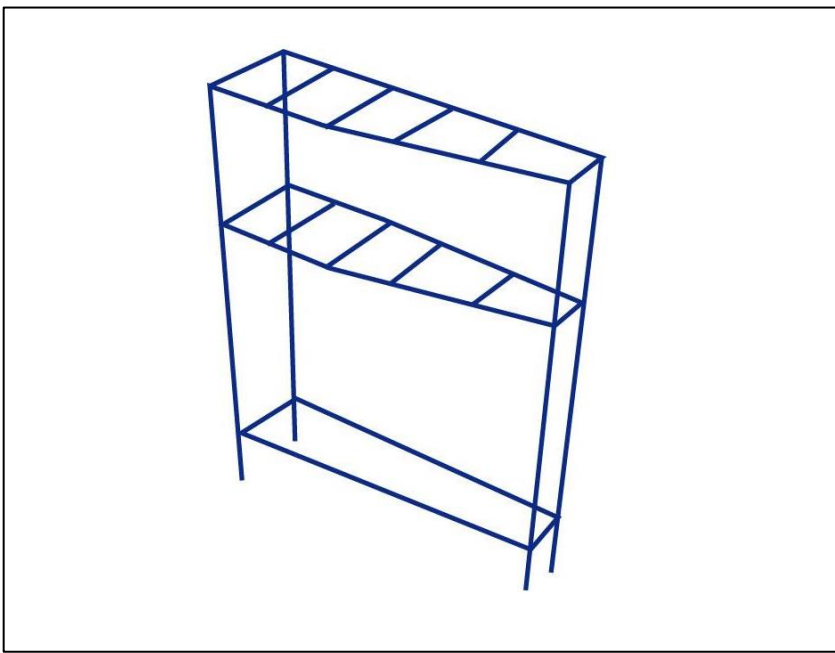




**Figura 39. Vista en elevación de estructura de soporte de canal de entrada**

**Fuente:** Los autores.

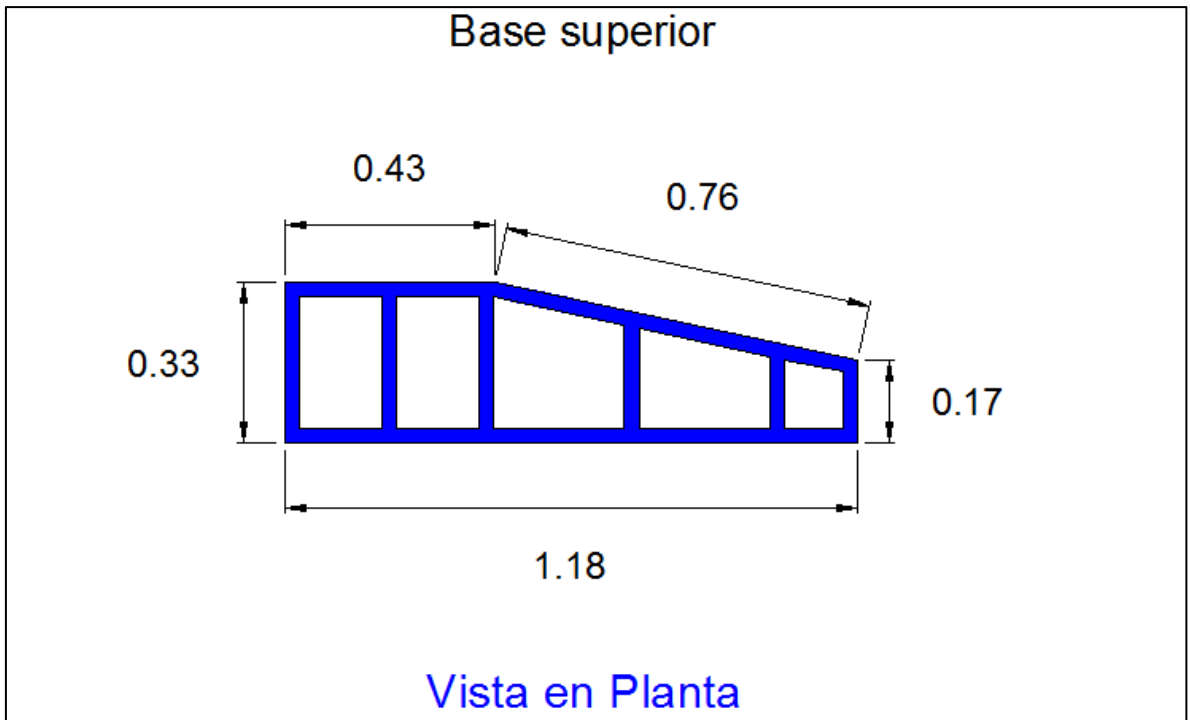
La base inferior, de la estructura de soporte de canal de entrada, presenta iguales dimensiones y características que la base superior. A continuación se ilustra una vista tridimensional de la estructura de soporte del canal de entrada al tanque de circulación:



**Figura 40. Vista tridimensional de estructura de soporte de canal de entrada**

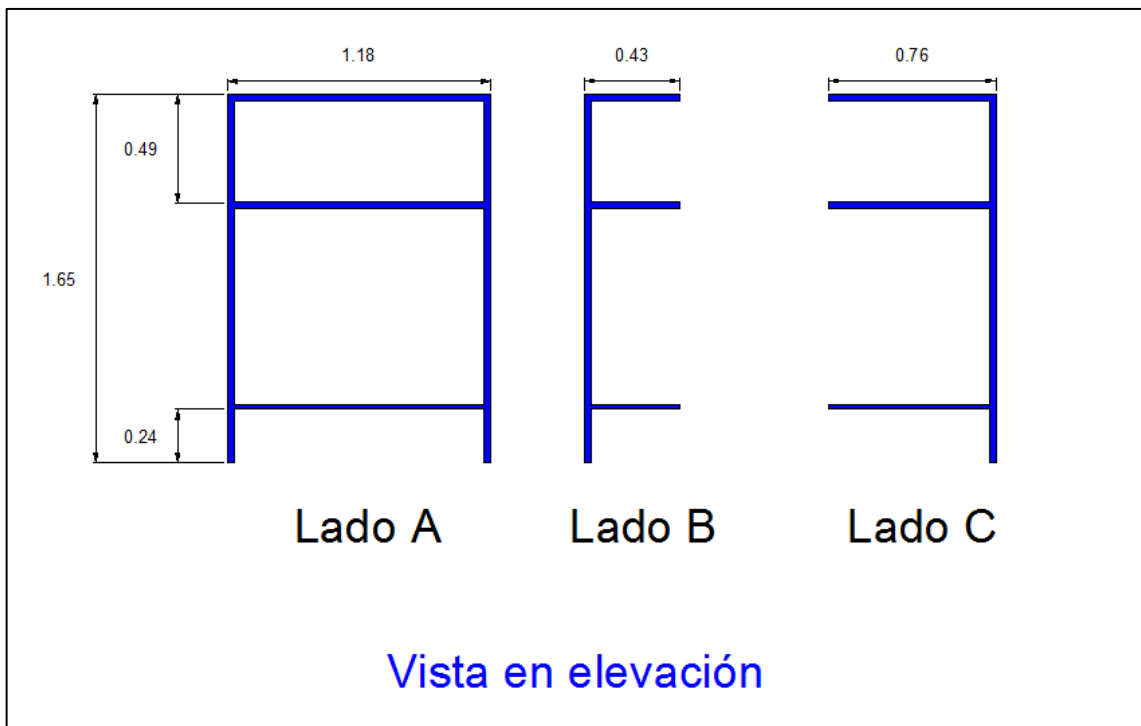
**Fuente:** Los autores.

Las dimensiones de los diferentes componentes de la estructura se muestran en las figuras 41, 42 y 43.



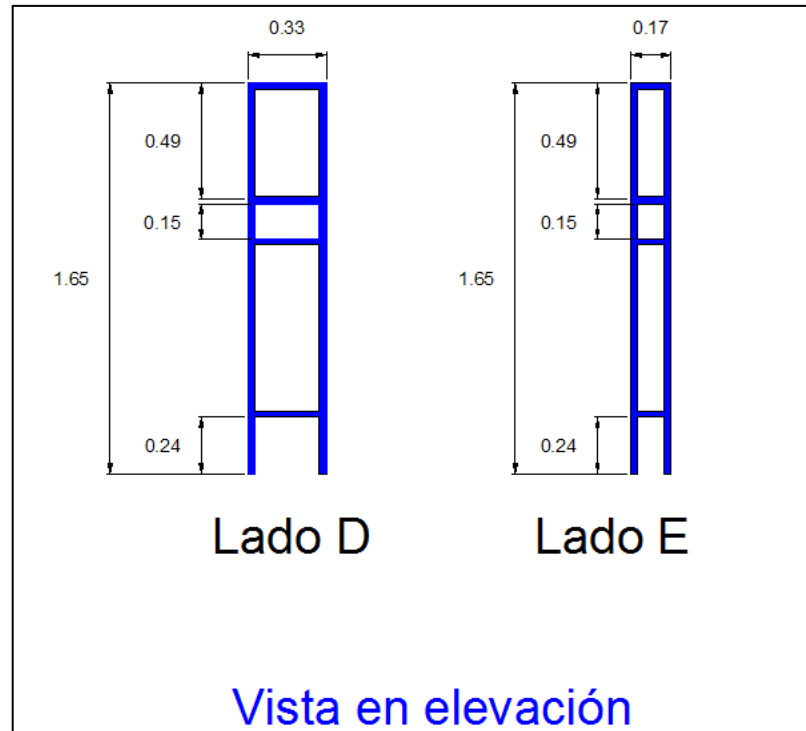
**Figura 41. Vista en planta de estructura de soporte de canal de entrada y transición**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 42. Vista en elevación de elementos de la estructura de soporte de canal de entrada**

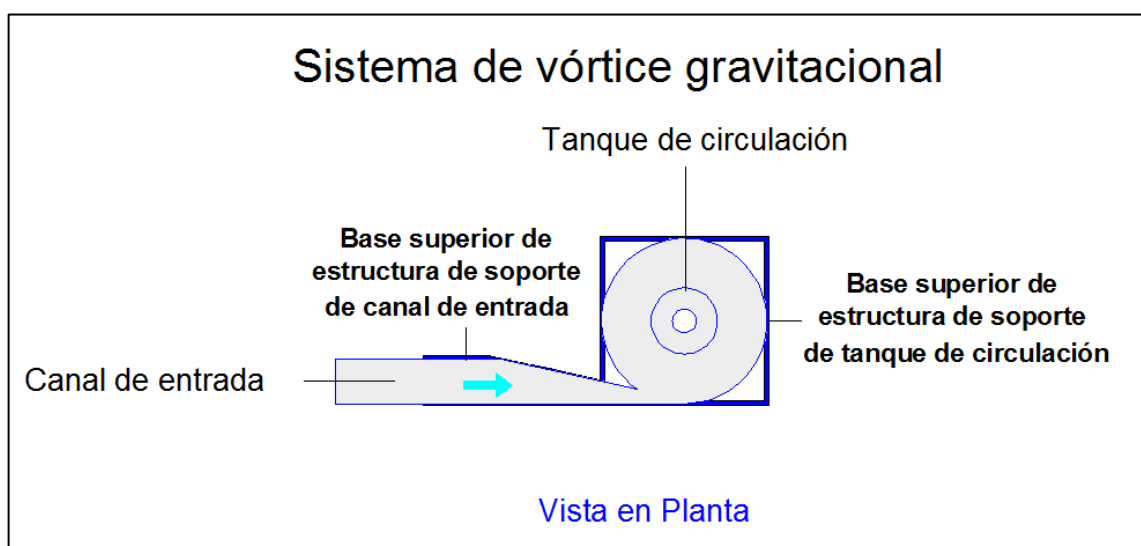
**Fuente:** Los autores.



**Figura 43. Vista en elevación de elementos de la estructura de soporte de canal de entrada**

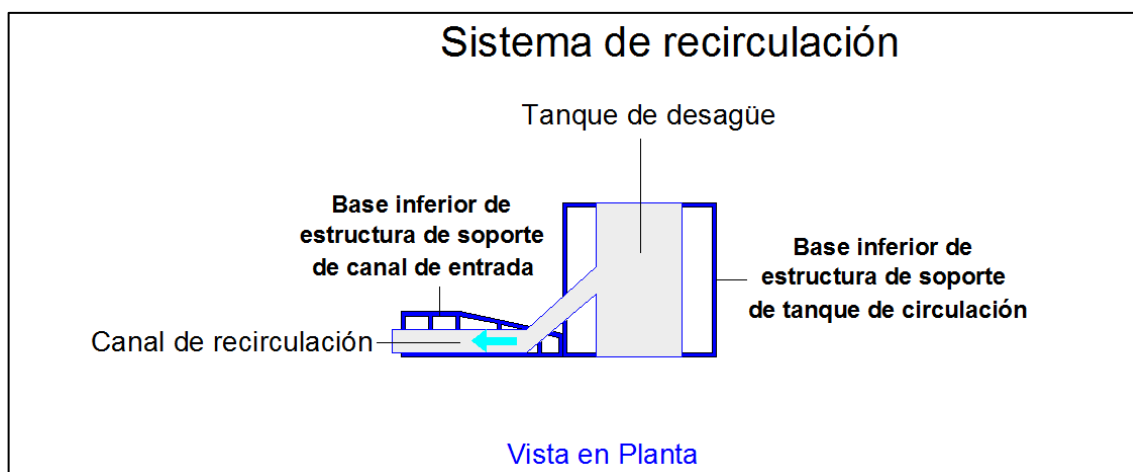
**Fuente:** Los autores.

A continuación, en la Figura 44, se muestra un esquema de la vista en planta de la estructura de soporte con el sistema de vórtice implementado, de igual manera, en la Figura 45, se ilustra una representación del sistema de recirculación.



**Figura 44. Estructura de soporte con sistema de vórtice gravitacional**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 45. Estructura de soporte con sistema de recirculación**

**Fuente:** Los autores.

El mecanismo de funcionamiento, del modelo a escala del sistema de vórtice gravitacional, es tal que, el agua captada del banco hidráulico es conducida, a través del canal del sistema, hacia el tanque de circulación, cuyo orificio en su base descarga el agua hacia el tanque de desagüe, posteriormente, el líquido es conducido por el canal de recirculación hacia el depósito principal del banco hidráulico.

### 3.2. Modelo físico para laboratorio

Una vez concluido el diseño de todos los componentes del sistema a escala de vórtice gravitacional, se llevó a cabo su construcción y posterior instalación en el laboratorio de hidráulica del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja.

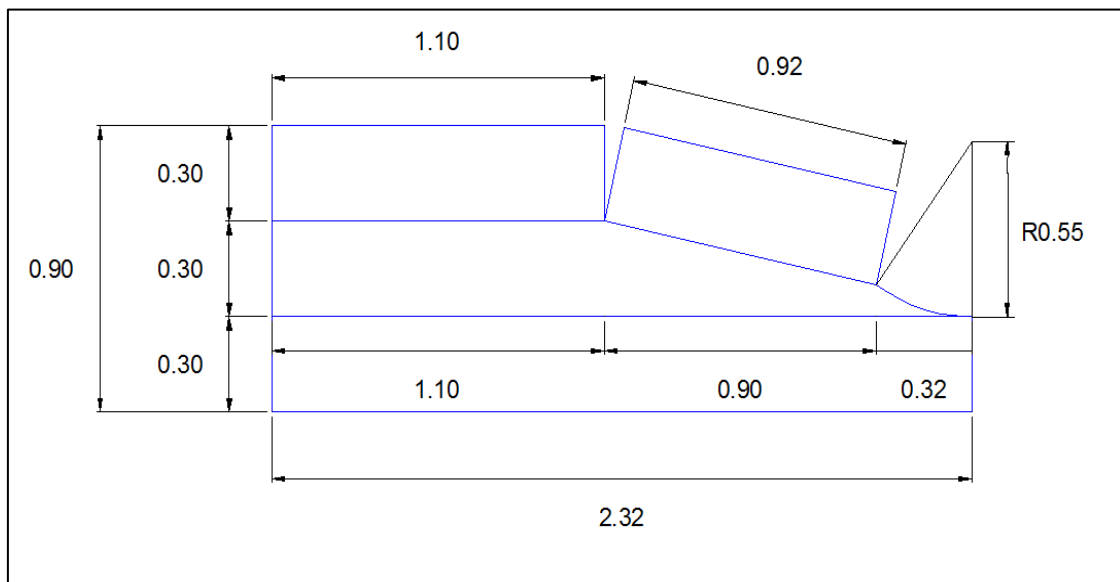
Como punto de partida, en el proceso de fabricación, se efectuó la selección de los materiales constituyentes del sistema. La elección del tipo de material a utilizar se realizó en función de las características de cada elemento, así como, de las solicitaciones a las que se encontraría sujeto. Así por ejemplo, se empleó plancha de acero galvanizada de 1.15 mm de espesor para la fabricación del canal de entrada, tanque de circulación, conos de descarga, sistema de recirculación y álabes de las turbinas.

Por otro lado, la mayoría de los componentes del módulo de transmisión son de acero inoxidable, a excepción de las placas de soporte, las cuales se fabricaron en plancha de hierro de 1 cm de espesor. Finalmente, la estructura del sistema de soporte se compone de ángulos de acero de 1 ½" x ¼."

### 3.2.1. Fabricación de canal de entrada, tanque de circulación y conos de descarga

Para evitar percances con respecto al tamaño de la estructura a escala, se decidió que el sistema tenga al canal de entrada, al tanque de circulación y conos de descarga como elementos independientes, que puedan ser ensamblados.

El primer componente, del proceso de fabricación, fue el canal de entrada. Para que este elemento se acople de manera adecuada al tanque de circulación, se hizo uso de las dimensiones y características geométricas mostradas en la Figura 46, en la que se especifica la manera en que se trazó las líneas sobre la plancha de acero, para su posterior corte y doblaje.



**Figura 46. Trazado para fabricación de canal de entrada**

**Fuente:** Los autores.

A continuación se exponen algunas fotografías del proceso constructivo del canal de entrada:



**Figura 47. Corte y doblaje de canal de entrada**

**Fuente:** Los autores.

Posteriormente, se fabricó el tanque de circulación y los conos de descarga, a continuación se presentan algunas fotografías del proceso constructivo de estos elementos:



**Figura 48. Corte de base para canal de circulación**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 49. Tanque de circulación con orificio para cono de descarga**

Fuente: Los autores.



**Figura 50. Canal de entrada y tanque de circulación**

Fuente: Los autores.



**Figura 51. Canal de entrada y tanque de circulación con refuerzo**  
Fuente: Los autores.



**Figura 52. Proceso constructivo conos de descarga**  
Fuente: Los autores.



Finalmente, luego del proceso constructivo, se obtuvo el sistema a escala para experimentación.

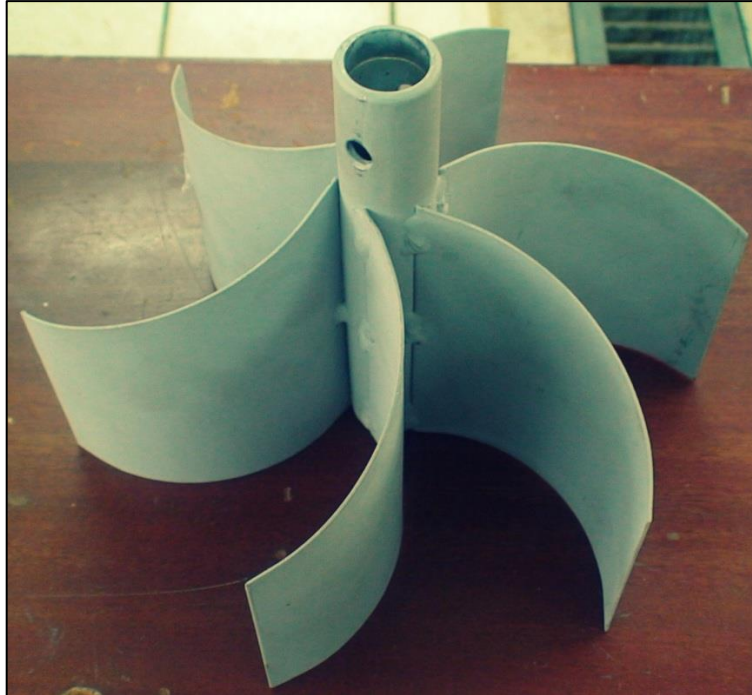


**Figura 53. Sistema de vórtice gravitacional para laboratorio**

**Fuente:** Los autores.

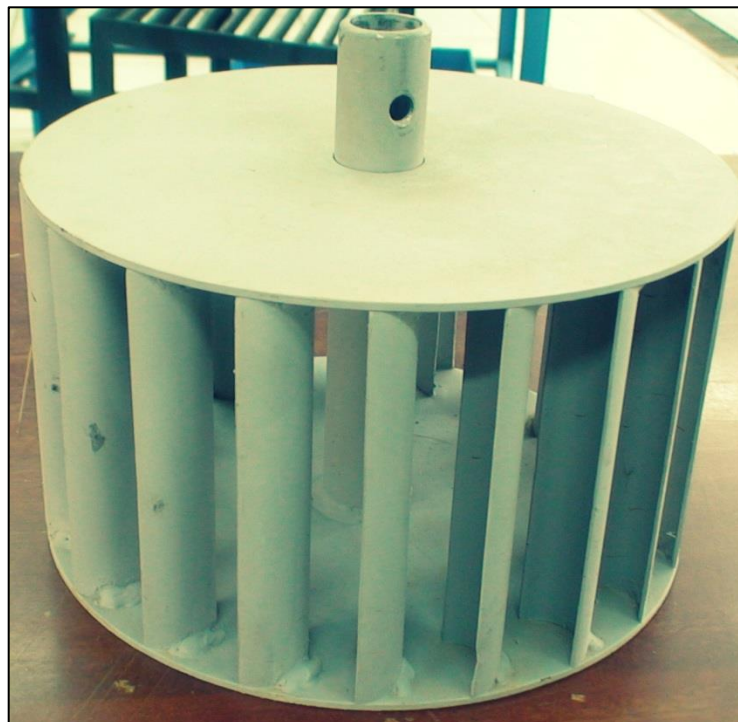
### 3.2.2. Turbinas para modelo experimental

A continuación se presenta las turbinas fabricadas para el sistema a escala de vórtice gravitacional:



**Figura 54. Turbina número uno**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 55. Turbina número dos**

**Fuente:** Los autores.

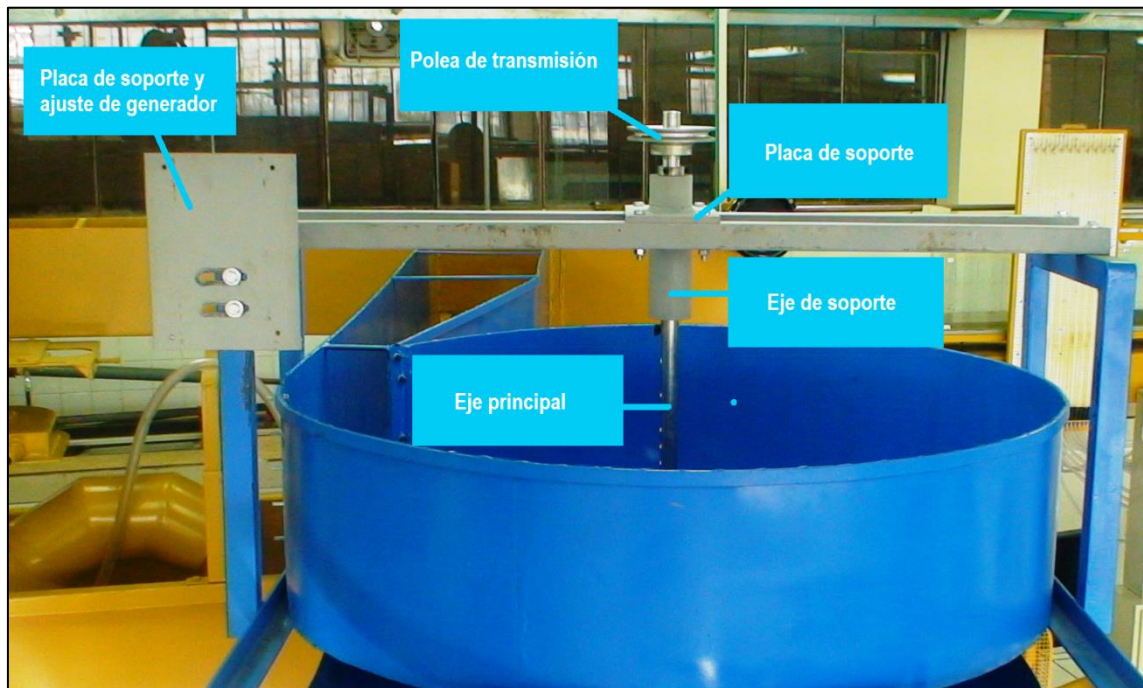


**Figura 56. Turbina número tres**

**Fuente:** Los autores.

### 3.2.3. Módulo de transmisión para modelo experimental

Posterior al diseño de este componente, del sistema de experimentación de vórtice gravitacional, se realizó su construcción e instalación. A continuación, en las figura 57 y 58, se expone el sistema fabricado.



**Figura 57. Módulo de transmisión instalado**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 58. Módulo de transmisión con turbina acoplada**

**Fuente:** Los autores.

Debido a que el objetivo principal de la presente investigación no es la optimización en la obtención de electricidad del sistema, para realizar las pruebas de obtención de voltaje, se hizo uso de un generador, perteneciente a la Universidad Técnica Particular de Loja, diseñado y utilizado en una investigación previa.



**Figura 59. Módulo de transmisión con generador eléctrico**

**Fuente:** Los autores.

#### **3.2.4. Acople a banco hidráulico y fabricación de sistema de soporte y recirculación**

Para la funcionalidad del sistema a escala de vórtice gravitacional, el modelo fue adaptado a un banco hidráulico de ensayos, perteneciente al laboratorio de la Sección de Recursos Hídricos del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja.

Se realizó la adaptación, al derivar, de un canal metálico que forma parte del banco hidráulico de ensayos, el sistema de vórtice gravitacional.



**Figura 60. Acople del sistema a escala de vórtice gravitacional**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 61. Acople del sistema a escala de vórtice gravitacional en funcionamiento**

**Fuente:** Los autores.

La estructura de soporte, como ya se mencionó anteriormente, se diseñó en función de la altura de acople. A continuación en las figuras 62 y 63 se muestra la estructura implementada. De igual manera la Figura 65 presenta el sistema de recirculación.



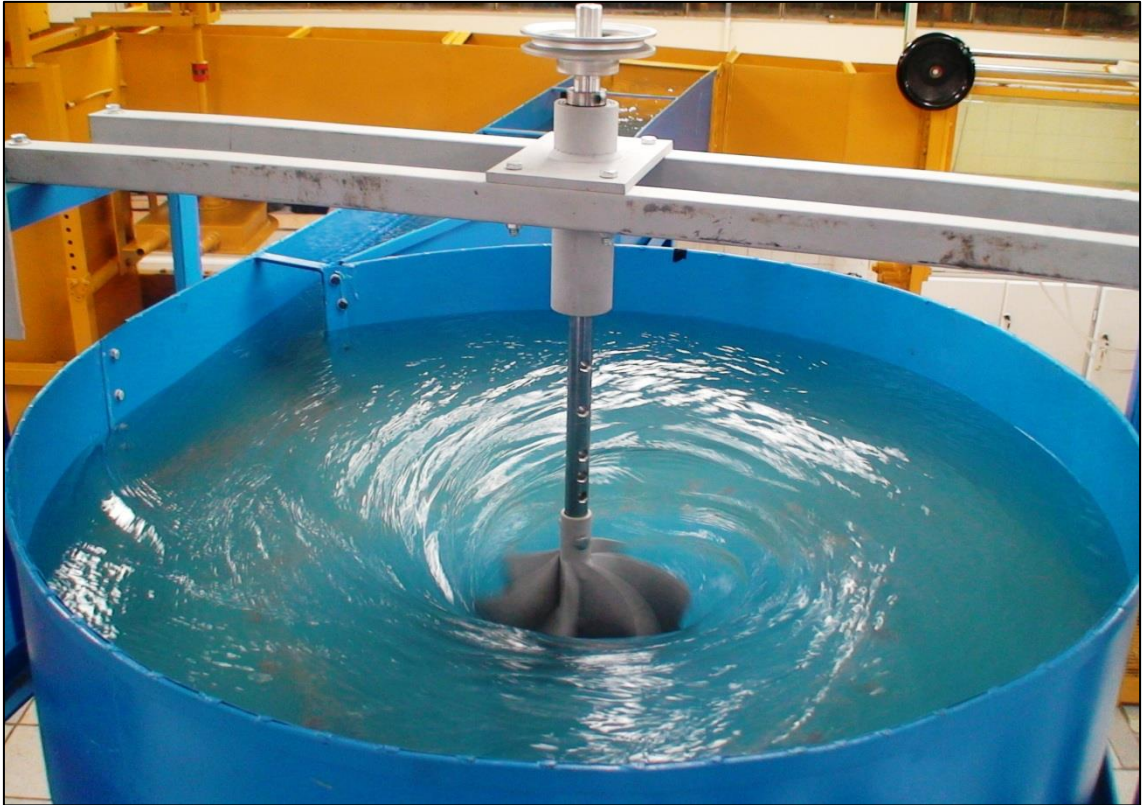
**Figura 62. Estructura de soporte de sistema a escala de vórtice gravitacional**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 63. Sistema a escala de vórtice gravitacional en funcionamiento**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 64. Sistema a escala de vórtice gravitacional con módulo de transmisión en funcionamiento**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 65. Sistema de recirculación en funcionamiento**

**Fuente:** Los autores.



Debido al tipo del acople realizado, la instrumentación del banco hidráulico de pruebas, no otorga con exactitud las magnitudes de los caudales derivados al sistema a escala de vórtice gravitacional. Por esta razón, se realizó el aforo de los caudales que ingresan al sistema.

Con condiciones de pendiente, rugosidad y base del canal constantes, los caudales de trabajo pueden ser expresados en función del tirante de agua del canal de entrada ( $y_c$ ).

**Tabla 8. Caudales y velocidades de trabajo de sistema a escala de vórtice gravitacional implementado en el laboratorio de hidráulica de la UTPL**

<b>b (m)</b>	<b><math>y_c</math> (m)</b>	<b>V media (m/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>
0.30	0.10	0.16	4.71
0.30	0.11	0.16	5.26
0.30	0.12	0.16	5.81
0.30	0.13	0.16	6.37
0.30	0.14	0.17	6.94
0.30	0.15	0.17	7.52
0.30	0.16	0.17	8.10
0.30	0.17	0.17	8.69
0.30	0.18	0.17	9.28
0.30	0.19	0.17	9.87
0.30	0.20	0.17	10.48
0.30	0.21	0.18	11.08
0.30	0.22	0.18	11.69
0.30	0.23	0.18	12.31
0.30	0.24	0.18	12.93
0.30	0.25	0.18	13.55

**Fuente:** Los autores

### 3.2.5. Descripción del experimento

Una vez instalados todos los elementos constitutivos del sistema a escala de vórtice gravitacional, se procedió al diseño del experimento. Conocidos ya los objetivos de la investigación, la eficiencia de la estructura diseñada, fue puesta a prueba al analizar los datos de:

- Tiempo de formación de vórtice
- Desempeño de turbinas
- Aceleración de flujo
- Voltaje generado

#### Tiempo de formación de vórtice

Para este primer ensayo los conos uno y dos fueron objeto de estudio, para de este modo, comprobar la influencia de la presencia del cono de descarga en el tiempo de formación del vórtice hidráulico.

El tiempo de formación fue evaluado en función del caudal de entrada. Para la medición del tiempo, se consideró como instante cero, la llegada del agua al tanque de circulación y como instante final, el tiempo transcurrido hasta obtener un vórtice gravitacional hidráulico estable, como el que se muestra en la Figura 66.



**Figura 66. Vórtice gravitacional hidráulico estable**

**Fuente:** Los autores.

## Desempeño de turbinas

Los conos uno, dos y tres, fueron puestos a prueba a través del uso de las turbinas y el módulo de transmisión, para de esta manera, recopilar una serie de datos, que sirvan de sustento para determinar la influencia del cono de descarga en la variación de la velocidad angular del vórtice gravitacional hidráulico.

La variable de experimentación fue la posición, con respecto al eje vertical, de cada turbina bajo estudio, de este modo, para cada uno de los conos se obtuvo una serie de datos. Las mediciones realizadas fueron:

- Tirante de agua en la sección final del canal de entrada ( $y_c$ ).
- Altura del vórtice hidráulico ( $y_v$ ) medida en la periferia del tanque de circulación.
- Velocidad angular ( $\omega$ ) en revoluciones por minuto (rpm).

Para obtener el valor de rpm de cada medición, se colocó dos líneas de referencia, la primera en el eje principal del sistema de transmisión y la segunda sobre el eje de soporte. En el instante cero de la medición, las dos líneas de referencias se encontraban alineadas, y posteriormente, al girar el eje, cada vez que la línea de referencia número uno se alineaba nuevamente con la línea de referencia número dos se contabilizaba una vuelta. De esta manera se cuantificó el número de vueltas para un intervalo de 15 segundos, valor que se reemplazó en la ecuación [14] para obtener así el dato de velocidad angular en rpm.

$$\omega (rpm) = 4 \times NR15 \quad [14]$$

Donde, NR15 es el número de revoluciones en 15 segundos.

Conocidos ya los caudales de trabajo, se realizó una serie de mediciones para cada uno de ellos.

Cabe recalcar que, para medir el número de rpm, para cada caudal de trabajo, no se usó la banda de transmisión, ya que, al momento de transmitir el movimiento de rotación al generador, el número de rpm disminuye considerablemente, por ende, no se puede cuantificar de una manera adecuada la velocidad angular del sistema.

Como aspecto final se destaca que la medición de la velocidad angular, a través de la metodología propuesta, sólo otorga un valor aproximado de la velocidad de rotación del vórtice, ya que, factores como, el tipo de material, de las turbinas y de los componentes del sistema de transmisión, afecta el momento de inercia, del cual depende principalmente la medición.

### Incremento en velocidad de flujo

Para analizar el incremento de velocidad debido a las características geométricas del canal de entrada, transición y tanque de circulación, se determinó la velocidad del flujo en los puntos:

- 1.20 m previo a la entrada del tanque de circulación.
- Radio de 22 cm con respecto al centro del tanque de circulación.
- Radio de 13 cm con respecto al centro del tanque de circulación.

La velocidad en el punto “a” fue medida a través del uso de un Tubo de Pitot, mientras que la velocidad en los puntos “e” y “f” se determinó al transformar la velocidad angular de las turbinas número tres y número uno, a través del uso de la expresión [11].

$$V (m/s) = r (m) \times \omega (rad/s) \quad [11]$$

Donde  $r$  es el radio de trabajo de la turbina; y  $\omega$  la velocidad angular. En la Figura 67 se expone los puntos de velocidad bajo estudio.

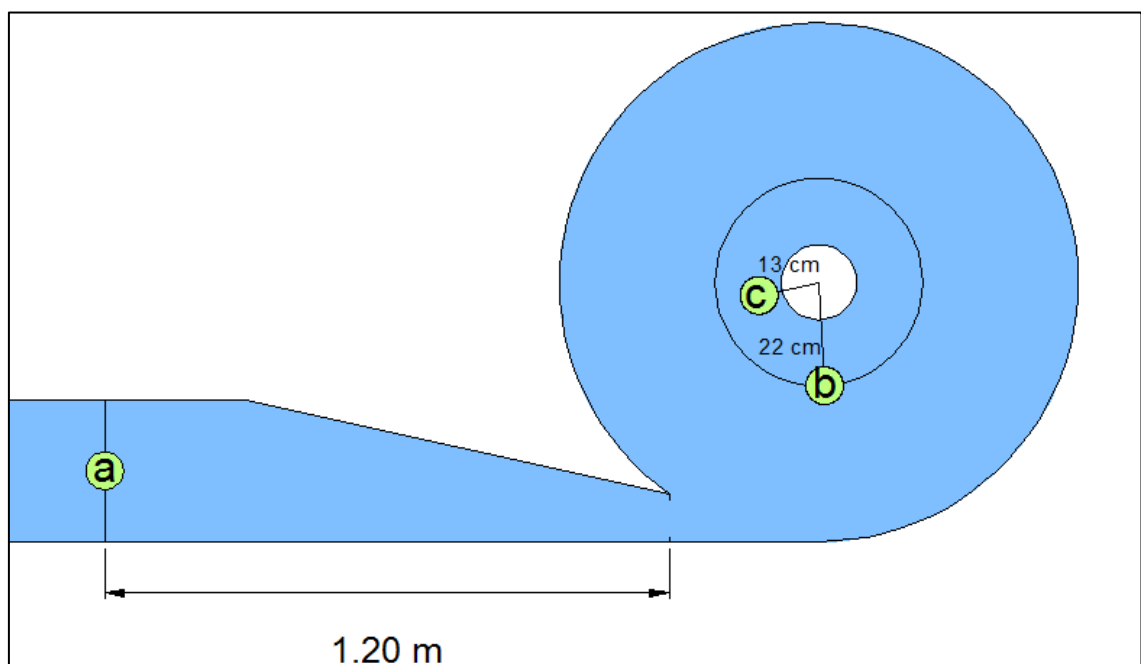


Figura 67. Puntos de medición de velocidad

Fuente: Los autores.

## Voltaje generado

Se realizó pruebas de obtención de voltaje del sistema, para esto, se empleó un generador de corriente alterna asíncrono, monofásico de fase dividida. Este generador, como ya se mencionó anteriormente, fue diseñado y utilizado en una investigación previa. En la Tabla 9 se presenta las características técnicas de del generador.

**Tabla 9. Características técnicas generador utilizado**

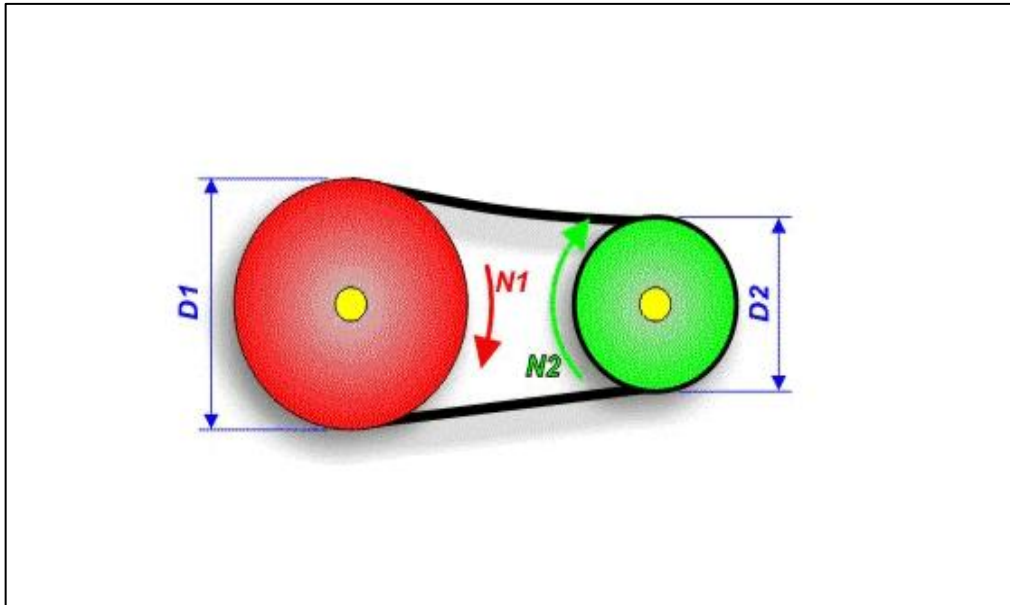
Parámetro	Característica técnica
Velocidad de rotación	115-430 rpm
Potencia	60 W
Voltaje	20 V AC
Corriente	3A
Polos	6 Pares

**Fuente:** Ortega J, Romero G, Jaramillo J. Diseño, Generación eléctrica y monitoreo de un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional. UTPL.

Debido a las características del generador, con el fin de multiplicar el número de revoluciones transmitidas por el sistema, se optó por usar una polea de 2 pulgadas en el eje del generador, de este modo (conocido el diámetro de 5 pulgadas del eje principal del módulo de transmisión) el número de revoluciones generadas por el sistema, se multiplicará 2.5 veces fundamentados en el principio de multiplicación de poleas, el cual expone que, la transmisión de movimientos entre dos ejes mediante poleas está en función de los diámetros de estas, cumpliéndose en todo momento:

$$N1 \times D1 = N2 \times D2 \quad [15]$$

$$N2 = \frac{N1 \times D1}{D2} \quad [16]$$



**Figura 68. Multiplicador de velocidad de poleas**

Fuente: <http://xurl.es/zxgrl>

Para realizar las mediciones del voltaje generado por el sistema se utilizó un multímetro digital de corriente alterna.



**Figura 69. Multímetro digital de corriente alterna utilizado para la medición de voltaje**

Fuente: Los autores.

### 3.3. Análisis numérico

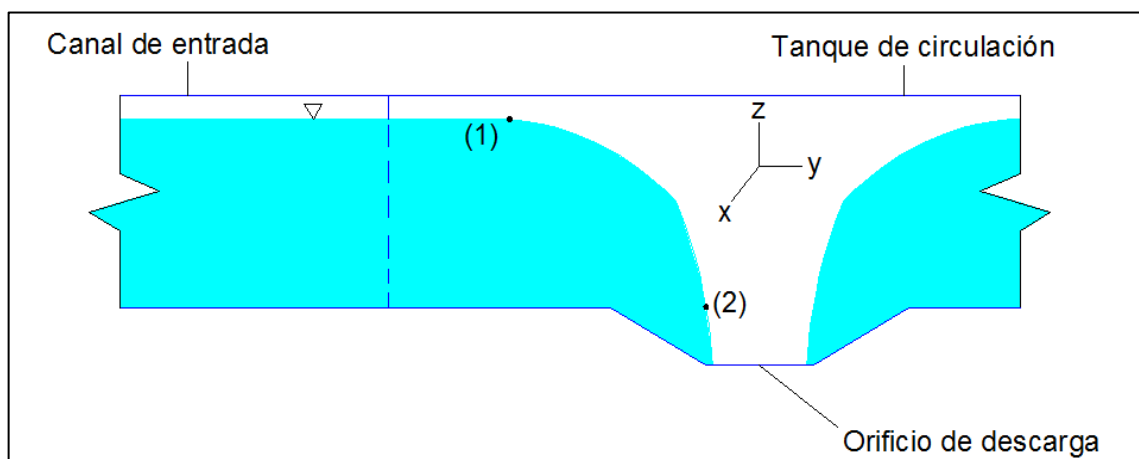
A través del análisis numérico se establece una metodología de cálculo para determinar la potencia teórica del sistema de vórtice gravitacional a escala implementado en laboratorio, y de esta manera, al hacer uso de los resultados de voltaje generado, determinar la eficiencia actual del modelo a escala.

Como parte de la metodología, se propone un proceso alternativo para determinar la altura neta  $Z_v$ , de un sistema de generación hidroeléctrica de vórtice gravitacional. Entiéndase altura neta como la diferencia de alturas totales a la entrada y salida de este tipo de sistemas.

Previas investigaciones consideran que la altura neta es igual a la altura del vórtice hidráulico. Por lo tanto se puede determinar la eficiencia general del sistema.

En la presente investigación, se plantea el uso de la expresión [17] para el cálculo de altura neta, la cual se fundamenta en la ecuación de Bernoulli. (16) A través de esta ecuación se puede determinar la altura neta en función de la posición de la turbina respecto al eje vertical.

$$Z_v = z_1 - z_2 = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad [17]$$



**Figura 70. Esquema de vórtice para análisis de altura neta**

**Fuente:** Los autores.

El punto número uno es considerado en el límite entre el vórtice libre y el vórtice forzado, mientras que el punto número dos, dentro de la zona de trabajo de la turbina hidráulica.

Al considerar que el vórtice se forma en un líquido a superficie libre, la presión atmosférica es constante en el punto uno y dos; además la velocidad en el punto uno es cero, para un flujo estacionario.(20) En consecuencia la ecuación se reduce a:

$$Zv = z_1 - z_2 = \frac{v_2^2}{2g} \quad [18]$$

La zona central del vórtice tiene tendencia a rotar como un sólido respecto a un eje, por esta razón, se puede hacer uso de la ecuación [11] para determinar la velocidad en el punto número dos. Por lo tanto, al remplazar [11] en [18] se tiene:

$$Zv = z_1 - z_2 = \frac{(\omega \times r)^2}{2 \times g} \quad [19]$$

Donde  $r$  es el radio de trabajo de la turbina expresado en metros; y  $\omega$  la velocidad angular de la turbina expresada en rad/s.

Con el valor  $Zv$  determinado, el valor teórico de la potencia eléctrica de la turbina se puede obtener a través de la expresión [1].

$$P(\text{vórtice}) = \rho g Z_v Q \quad [1]$$

Donde  $\rho = 1000 \frac{Kg}{m^3}$ ,  $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$  y  $Z_v = \text{altura neta}$ , Potencia en Watts.

Con el valor teórico de la potencia, se puede determinar la eficiencia de cualquier turbina bajo estudio, a través de la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{\text{turbina}}}{P_{\text{teórica}}} \quad [20]$$



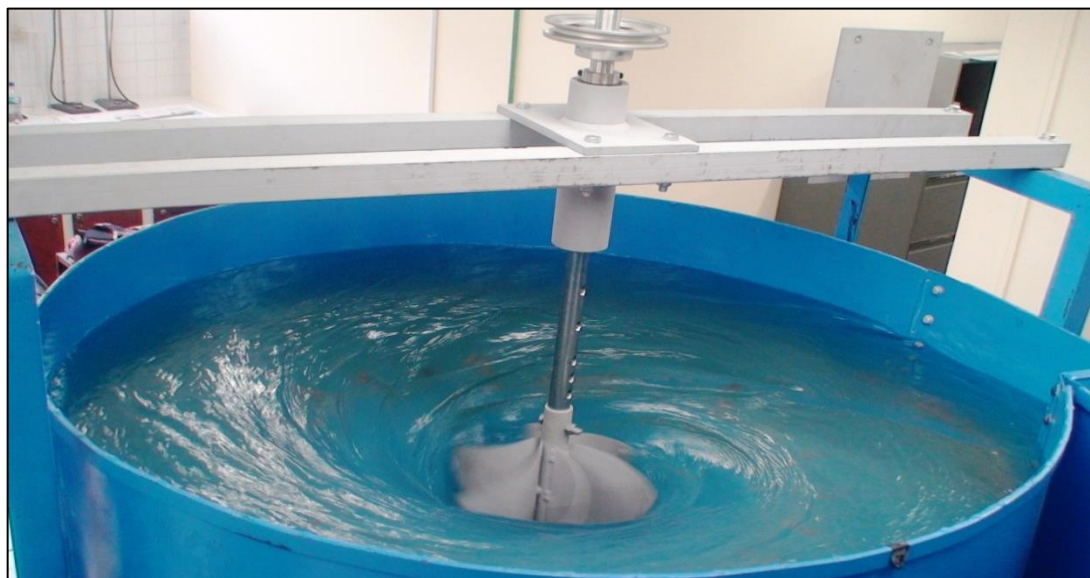
#### **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Este capítulo tiene por finalidad dar a conocer los resultados cuantitativos y cualitativos del proceso de experimentación, en laboratorio, del sistema a escala de vórtice gravitacional hidráulico.



**Figura 71. Sistema a escala de vórtice gravitacional implementado en laboratorio**

**Fuente:** Los autores.



**Figura 72. Sistema a escala de vórtice gravitacional en funcionamiento**

**Fuente:** Los autores.

#### 4.1. Tiempo de formación de vórtice gravitacional hidráulico

A continuación se exponen los datos del tiempo transcurrido hasta la formación de un vórtice hidráulico estable, para diferentes caudales.

La variable de estudio en este proceso, fue el diámetro mayor del cono de descarga; 0.44 cm en el caso del cono número uno y 0.24 cm para el cono número dos.

**Tabla 10. Tiempo de formación de vórtice hidráulico; cono número uno**

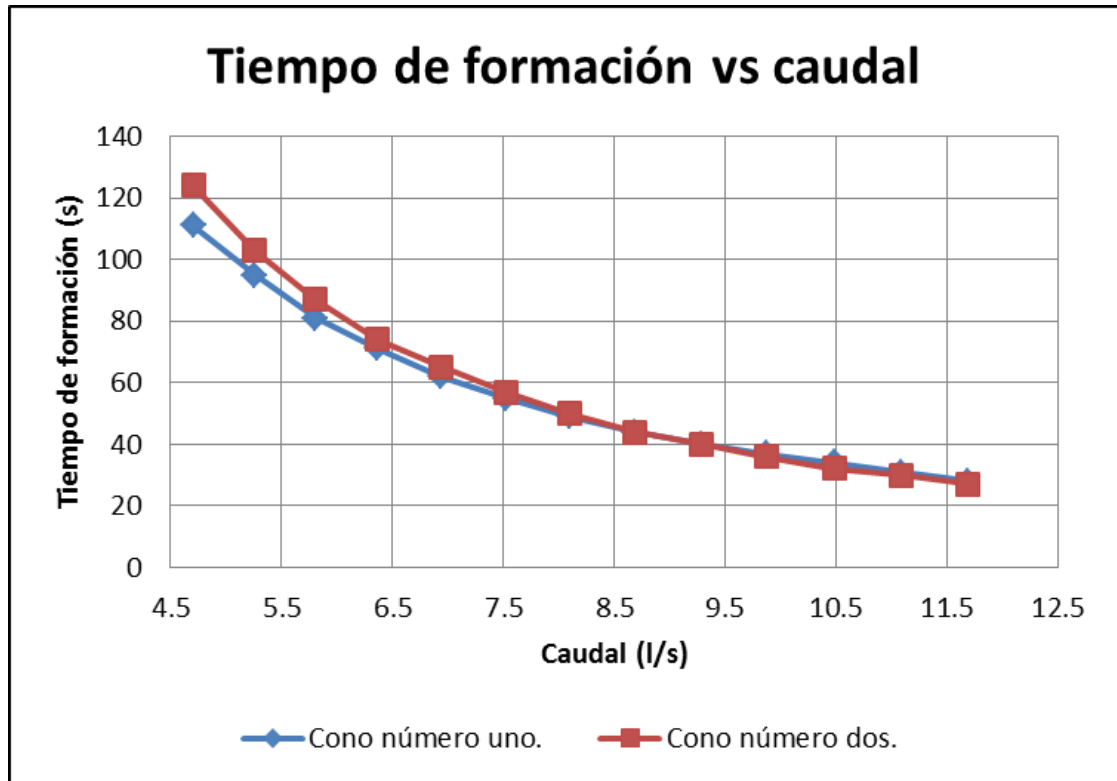
Q (l/s)	t(s)
4.71	111
5.26	95
5.81	81
6.37	71
6.94	62
7.52	55
8.10	49
8.69	44
9.28	40
9.87	37
10.48	34
11.08	31
11.69	28

**Fuente:** Los autores.

**Tabla 11. Tiempo de formación de vórtice hidráulico; cono número dos**

Q (l/s)	t(s)
4.71	124
5.26	103
5.81	87
6.37	74
6.94	65
7.52	57
8.10	50
8.69	44
9.28	40
9.87	36
10.48	32
11.08	30
11.69	27

**Fuente:** Los autores.



**Figura 73. Tiempo de formación vs caudal; cono uno y dos**

**Fuente:** Los autores.

Se puede observar que al disminuir la magnitud del diámetro mayor del cono de descarga, el tiempo de formación de un vórtice hidráulico estable incrementa, para los caudales que se encuentran en el rango de 4.71 l/s a 8.69 l/s. Los tiempos por encima de este rango son similares para los conos uno y dos.

#### 4.2. Desempeño de grupo de turbinas con cono de descarga número uno

Esta sección expone los datos recopilados en el proceso de prueba del cono número uno, el cual posee un diámetro mayor de 0.44 centímetros.

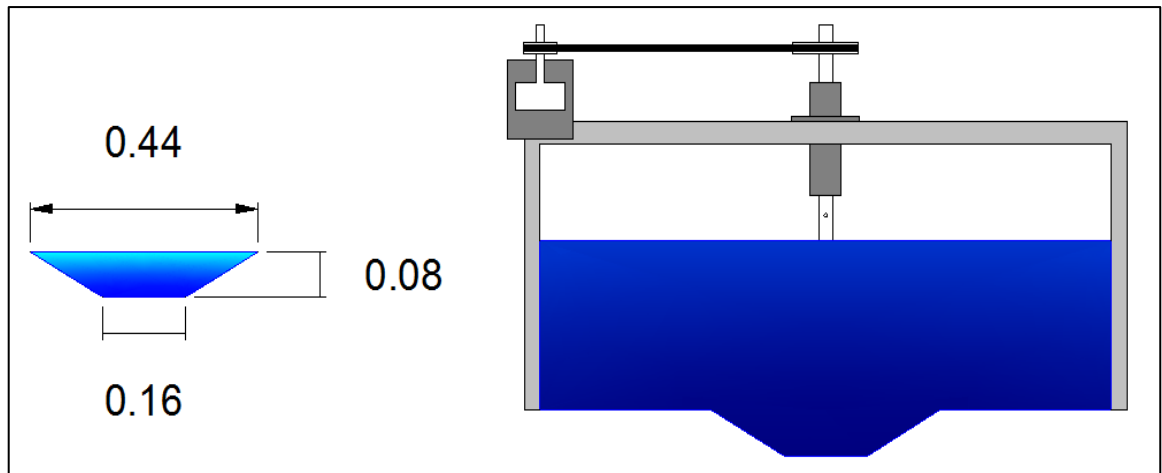


Figura 74. Esquema cono de descarga número uno

Fuente: Los autores.

#### 4.2.1. Desempeño de turbina número uno

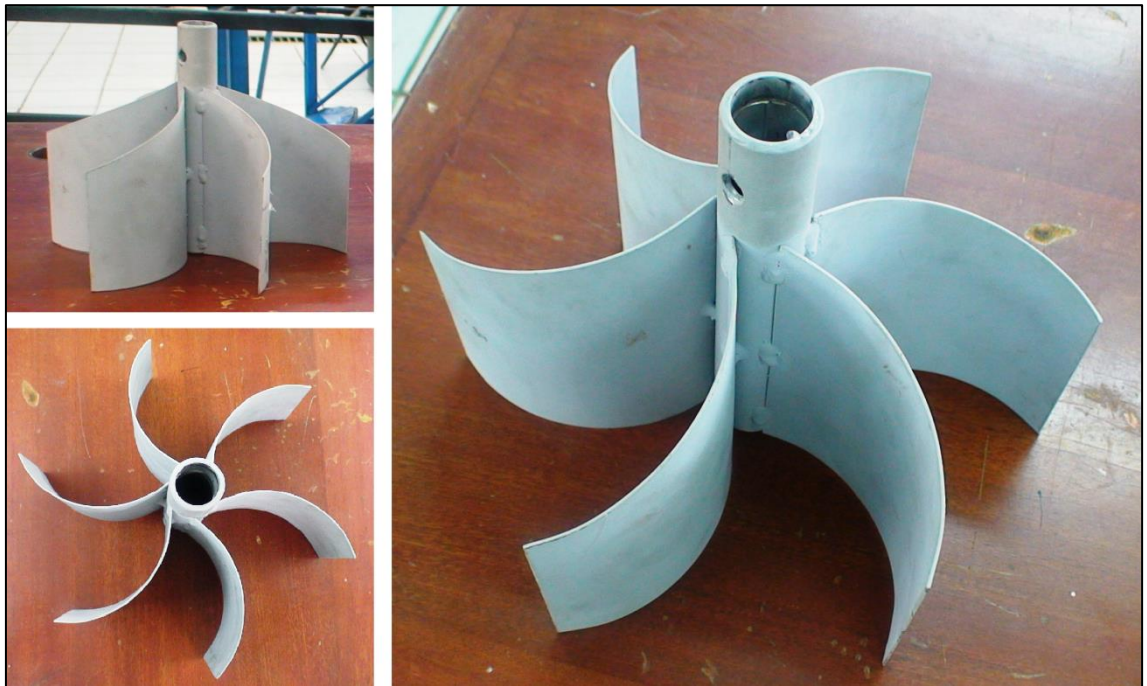


Figura 75. Turbina número uno

Fuente: Los autores.

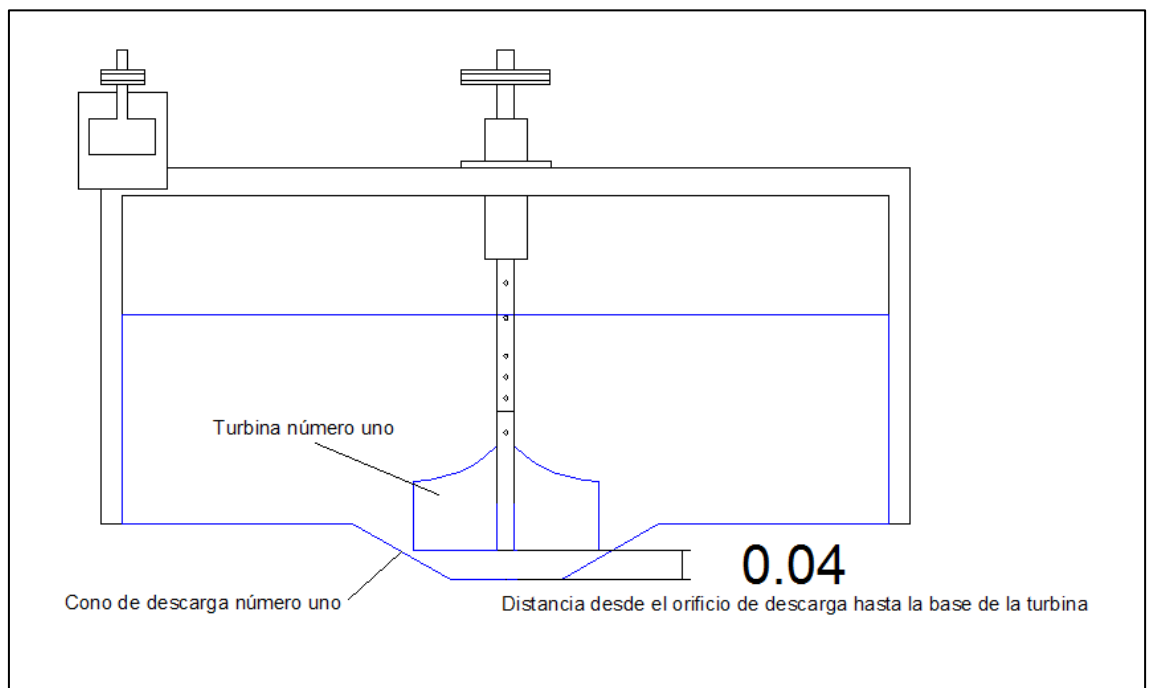


Figura 76. Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono uno-turbina uno

Fuente: Los autores.

Tabla 12. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	102	10.68
18	17	9.28	106	11.10
19	18	9.87	110	11.52
20	19	10.48	114	11.94
21	20	11.08	118	12.36
22	21	11.69	121	12.67
23	22	12.31	125	13.09
24	23	12.93	128	13.40
25	24	13.55	132	13.82

Fuente: Los autores.

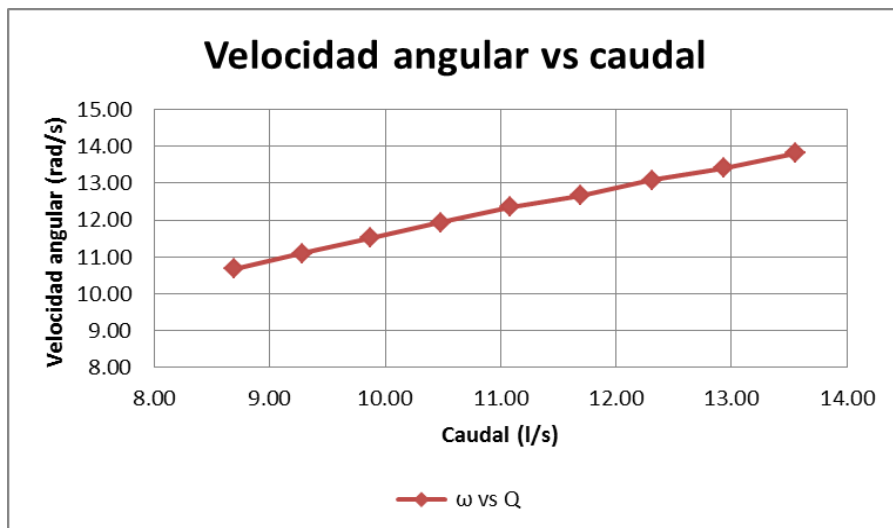
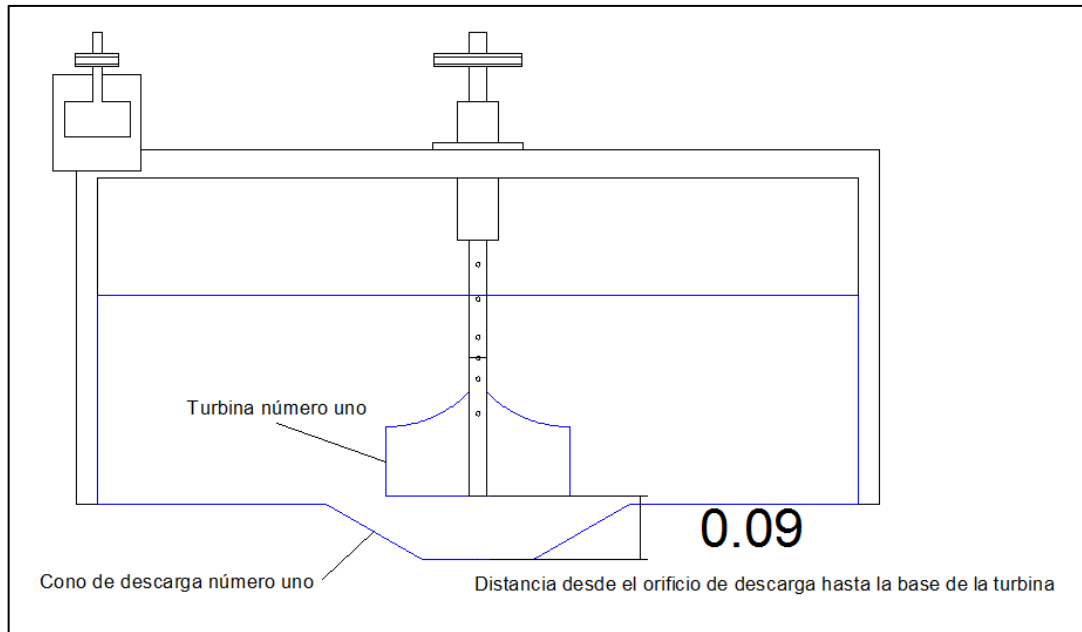


Figura 77. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

Fuente: Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 8.69 l/s (tirante en canal de entrada de 17 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



**Figura 78. Características de posición para segundo ensayo de desempeño; cono uno-turbina uno**

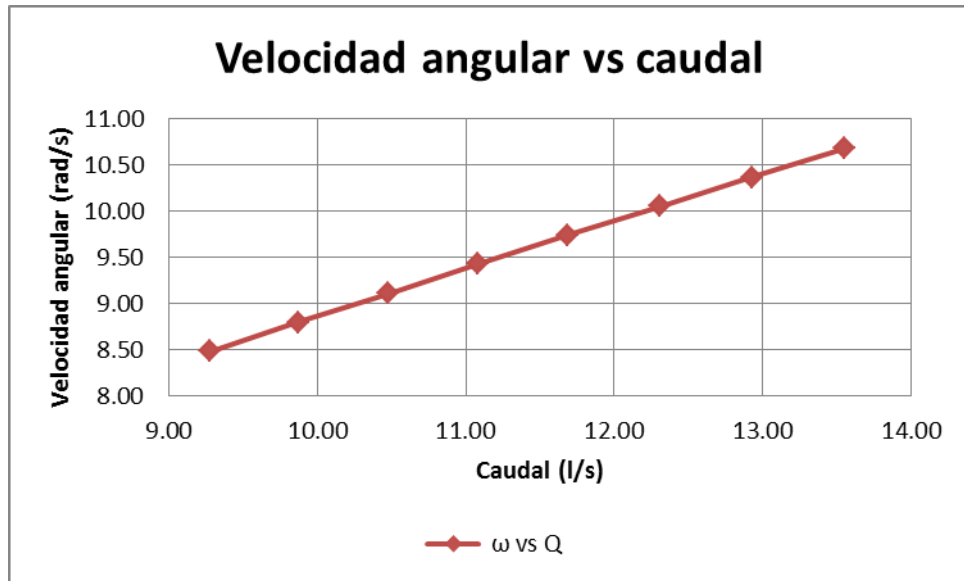
**Fuente:** Los autores.

**Tabla 13. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales**

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	-	-
18	17	9.28	81	8.48
19	18	9.87	84	8.80
20	19	10.48	87	9.11
21	20	11.08	90	9.42
22	21	11.69	93	9.74
23	22	12.31	96	10.05
24	23	12.93	99	10.37
25	24	13.55	102	10.68

**Fuente:** Los autores.

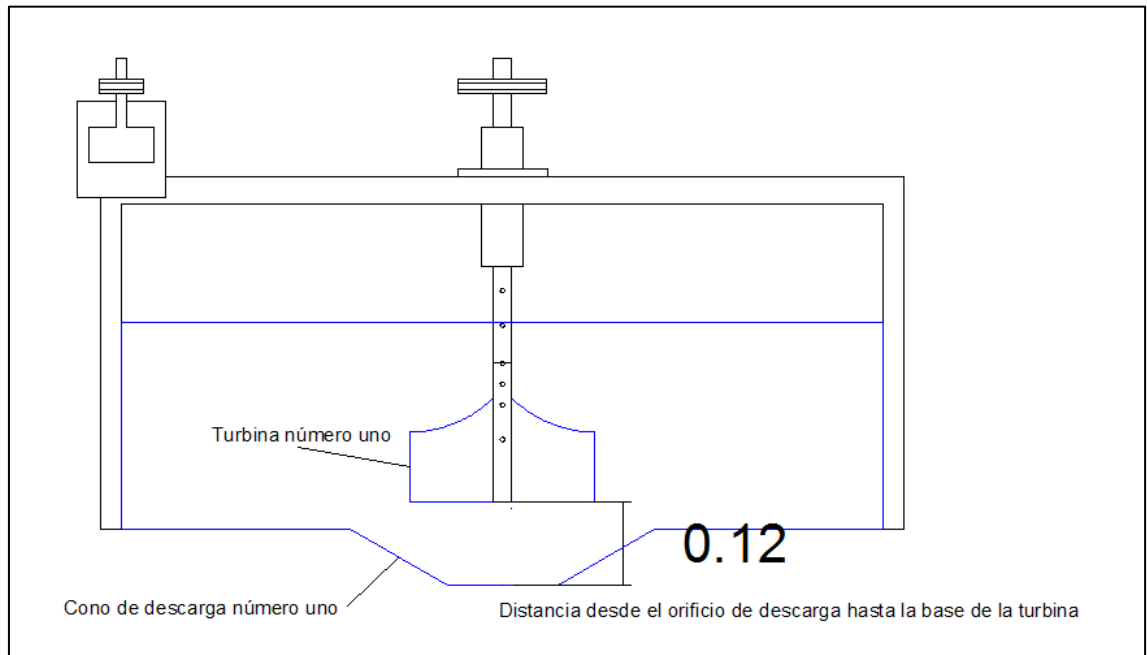




**Figura 79. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno**

**Fuente:** Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 9.28 l/s (tirante en canal de entrada de 18 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



**Figura 80. Características de posición para tercer ensayo de desempeño; cono uno-turbina uno**

**Fuente:** Los autores.

Tabla 14. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	-	-
18	17	9.28	55	5.76
19	18	9.87	58	6.07
20	19	10.48	61	6.39
21	20	11.08	64	6.70
22	21	11.69	67	7.02
23	22	12.31	70	7.33
24	23	12.93	73	7.64
25	24	13.55	76	7.96

Fuente: Los autores.

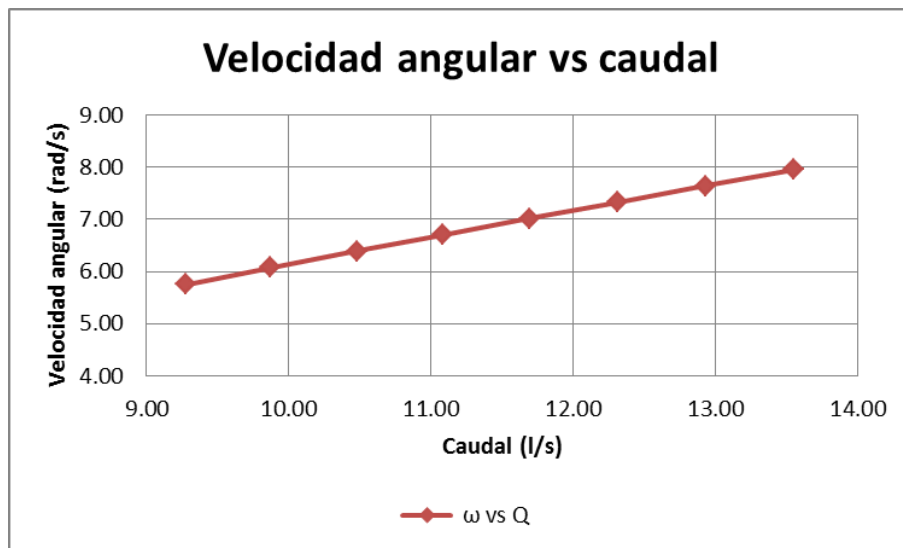
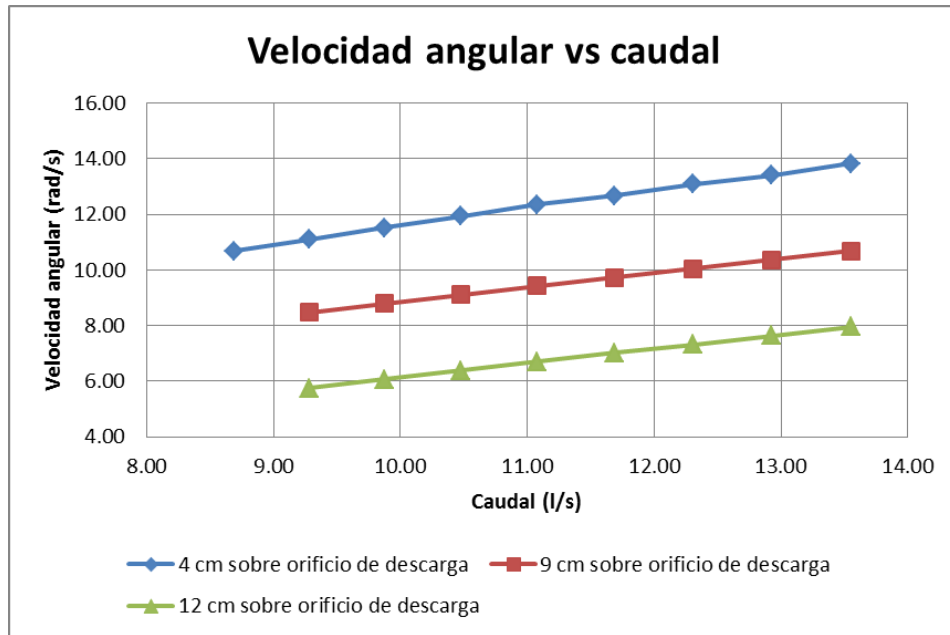


Figura 81. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

Fuente: Los autores.

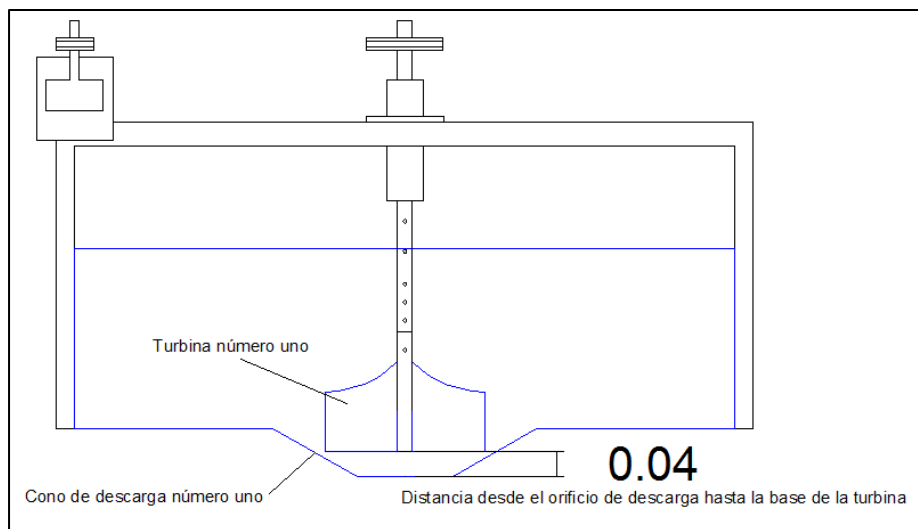
Para caudales de magnitud inferior a 9.28 l/s (tirante en canal de entrada de 18 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



**Figura 82. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 4 cm, 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno**

**Fuente:** Los autores.

El mejor desempeño de la turbina número uno, con el cono de descarga número uno, se registró cuando su ubicación con respecto al eje vertical fue de 4 cm sobre el orificio de descarga.



**Figura 83. Ubicación de mejor desempeño; cono uno-turbina uno**

**Fuente:** Los autores.

#### 4.2.2. Desempeño de turbina número dos

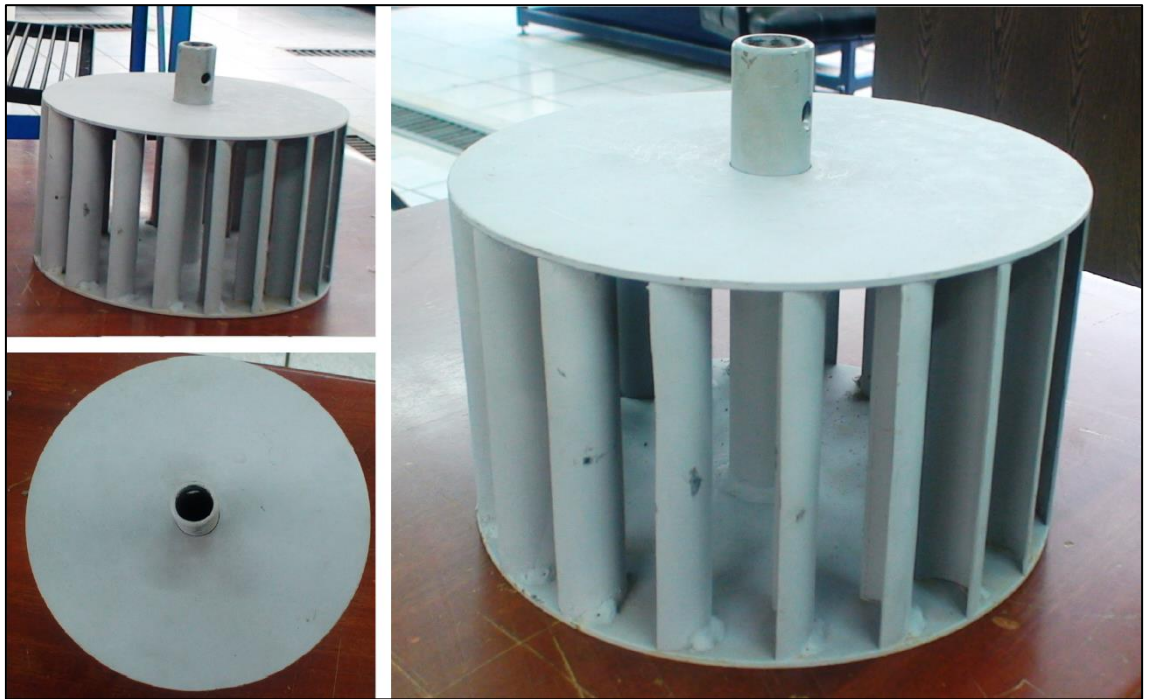


Figura 84. Turbina número dos

Fuente: Los autores.

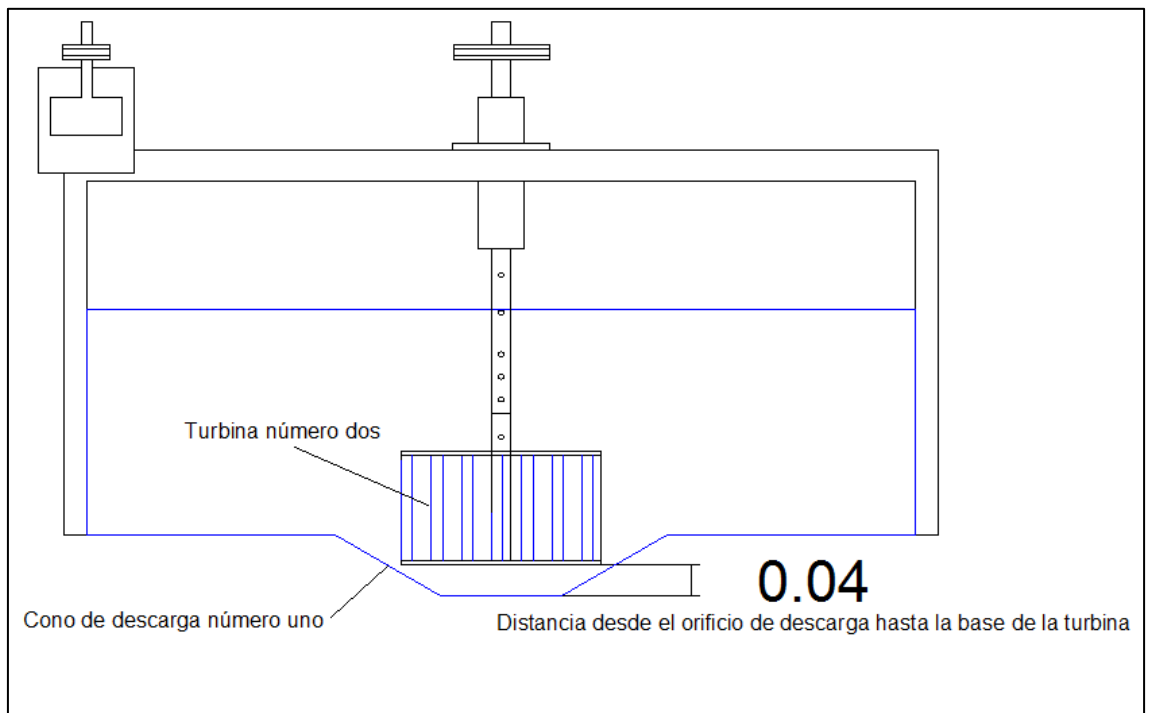


Figura 85. Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono uno-turbina dos

Fuente: Los autores.

Tabla 15. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	28	2.93
14	13	6.94	30	3.14
15	14	7.52	31	3.25
16	15	8.10	33	3.46
17	16	8.69	35	3.67
18	17	9.28	37	3.87
19	18	9.87	39	4.08
20	19	10.48	41	4.29
21	20	11.08	43	4.50
22	21	11.69	45	4.71
23	22	12.31	47	4.92
24	23	12.93	49	5.13
25	24	13.55	51	5.34

Fuente: Los autores.

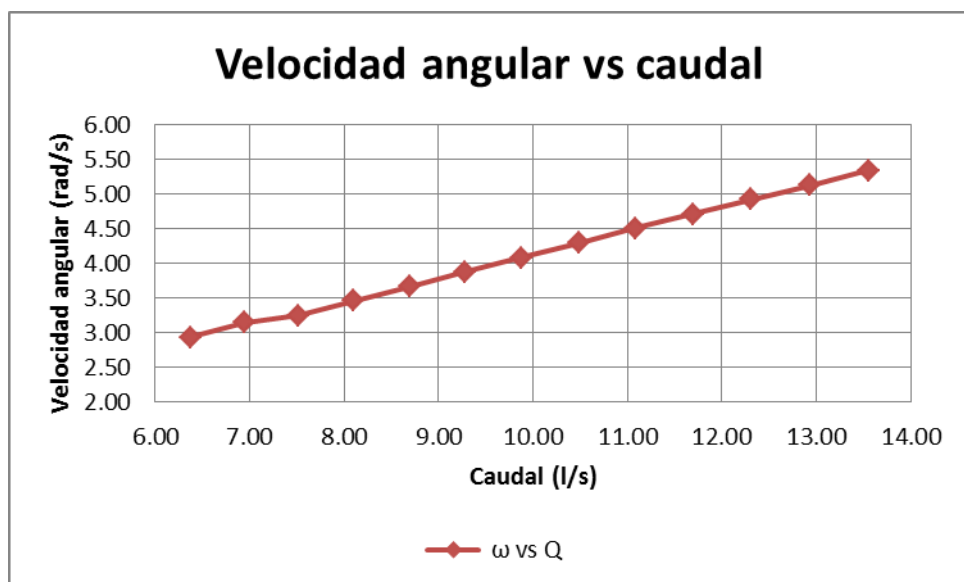
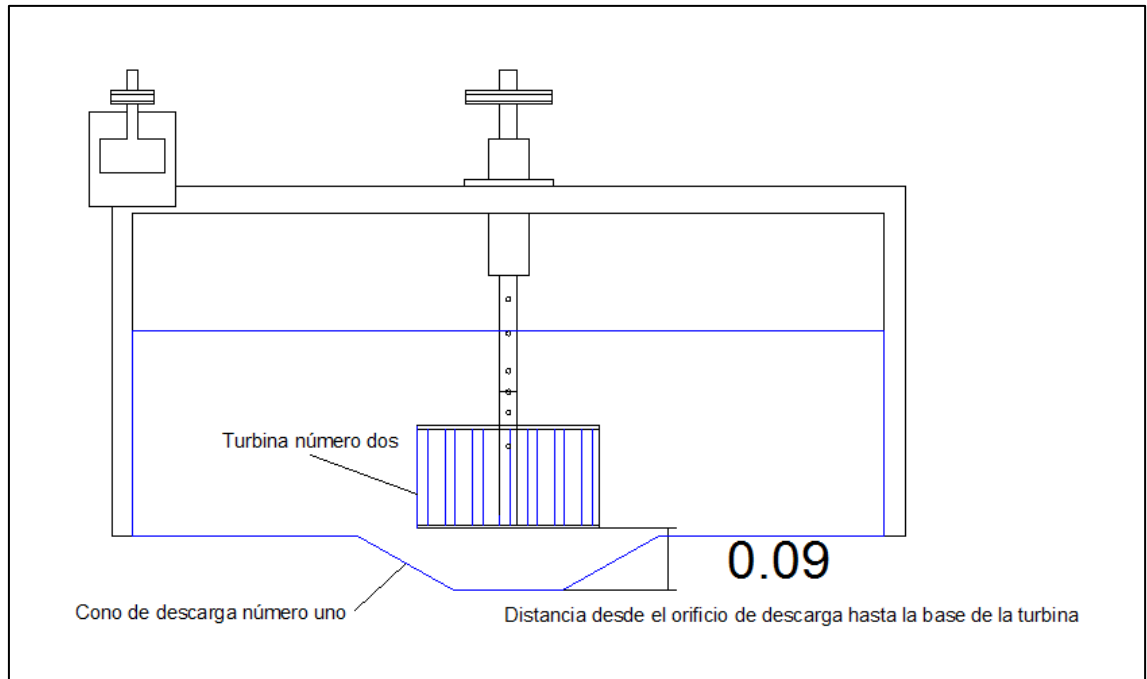


Figura 86. Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

Fuente: Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 6.37 l/s (tirante en canal de entrada de 13 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



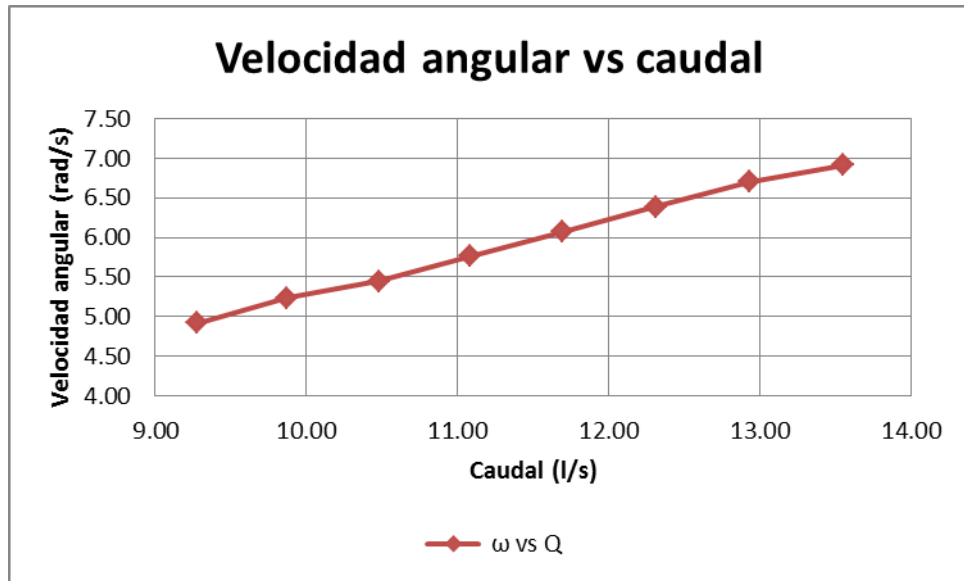
**Figura 87. Características de posición para segundo ensayo de desempeño; cono uno-turbina dos**

**Fuente:** Los autores.

**Tabla 16. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales**

$y_c$ (cm)	$y_v$ (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	-	-
18	17	9.28	47	4.92
19	18	9.87	50	5.24
20	19	10.48	52	5.45
21	20	11.08	55	5.76
22	21	11.69	58	6.07
23	22	12.31	61	6.39
24	23	12.93	64	6.70
25	24	13.55	66	6.91

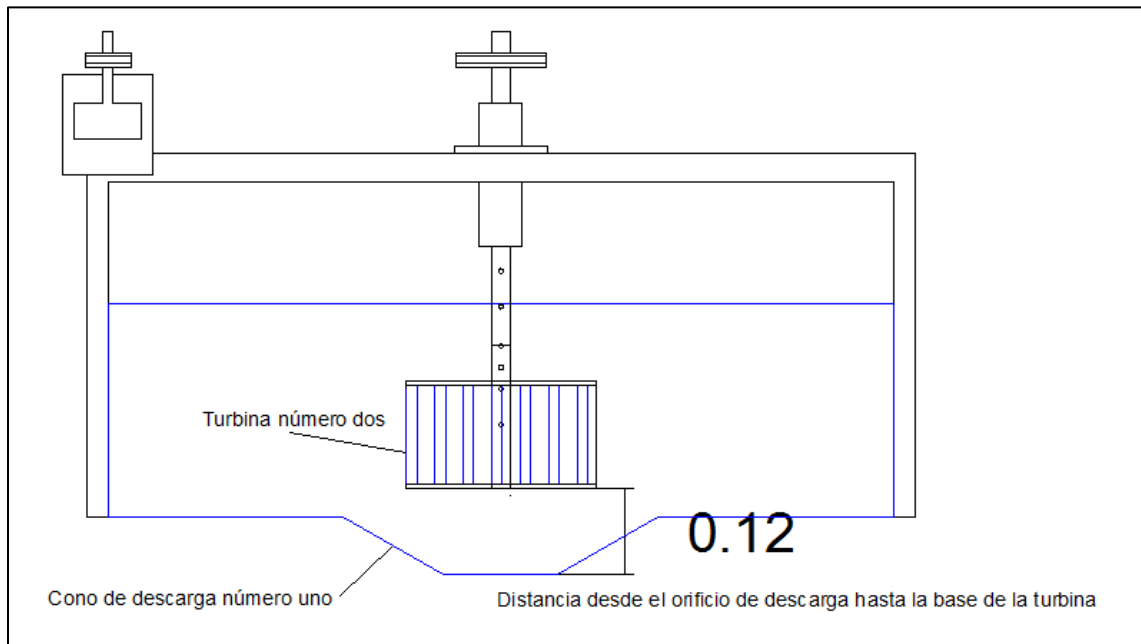
**Fuente:** Los autores.



**Figura 88.** Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

**Fuente:** Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 9.28 l/s (tirante en canal de entrada de 18 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



**Figura 89.** Características de posición para tercer ensayo de desempeño; cono uno-turbina dos

**Fuente:** Los autores.

Tabla 17. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	-	-
18	17	9.28	-	-
19	18	9.87	51	5.34
20	19	10.48	54	5.65
21	20	11.08	56	5.86
22	21	11.69	60	6.28
23	22	12.31	62	6.49
24	23	12.93	66	6.91
25	24	13.55	69	7.23

Fuente: Los autores.

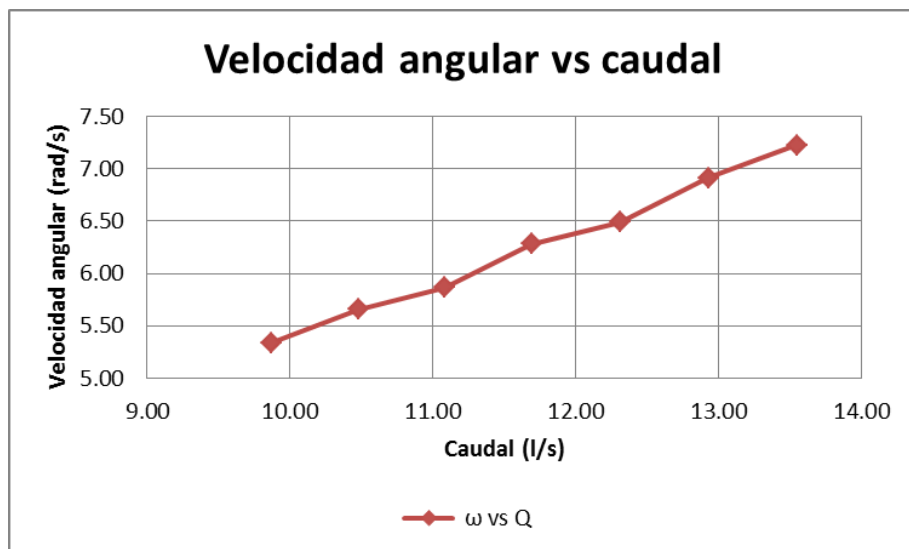
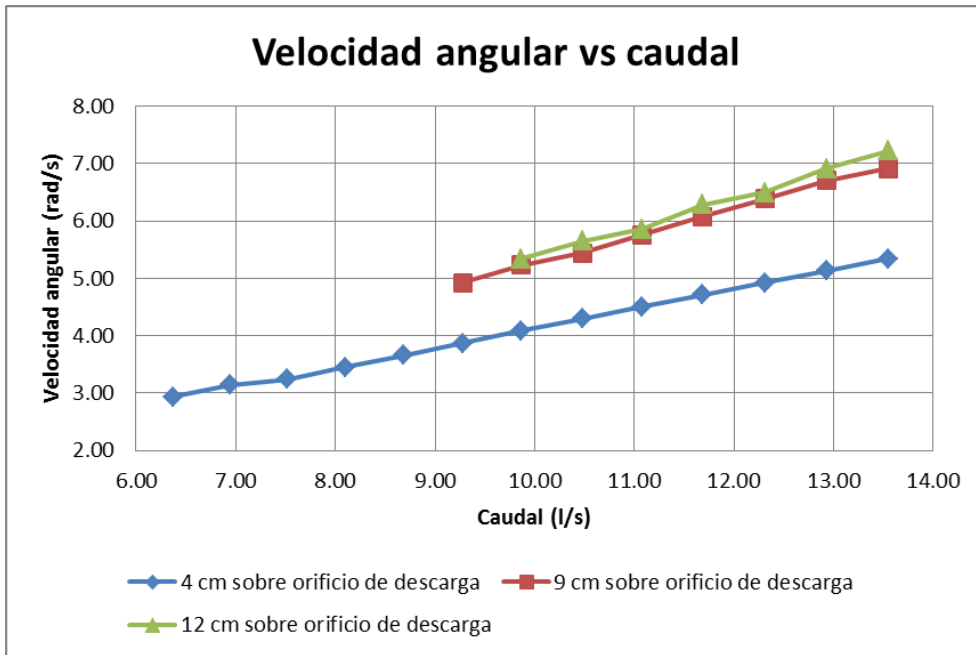


Figura 90. Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno

Fuente: Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 9.87 l/s (tirante en canal de entrada de 19 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.

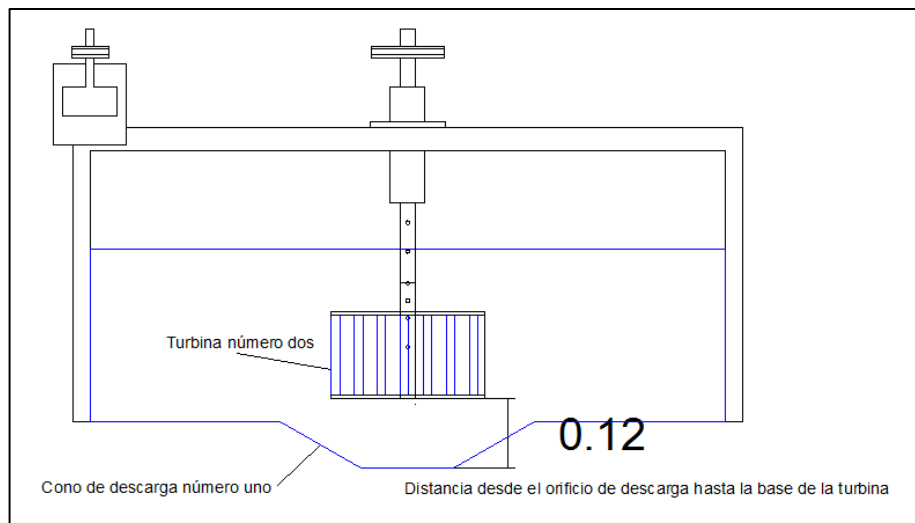




**Figura 91. Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 4 cm, 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno**

**Fuente:** Los autores.

El mejor desempeño de la turbina número dos, con el cono de descarga número uno, se registró cuando su ubicación con respecto al eje vertical fue de 12 cm sobre el orificio de descarga.

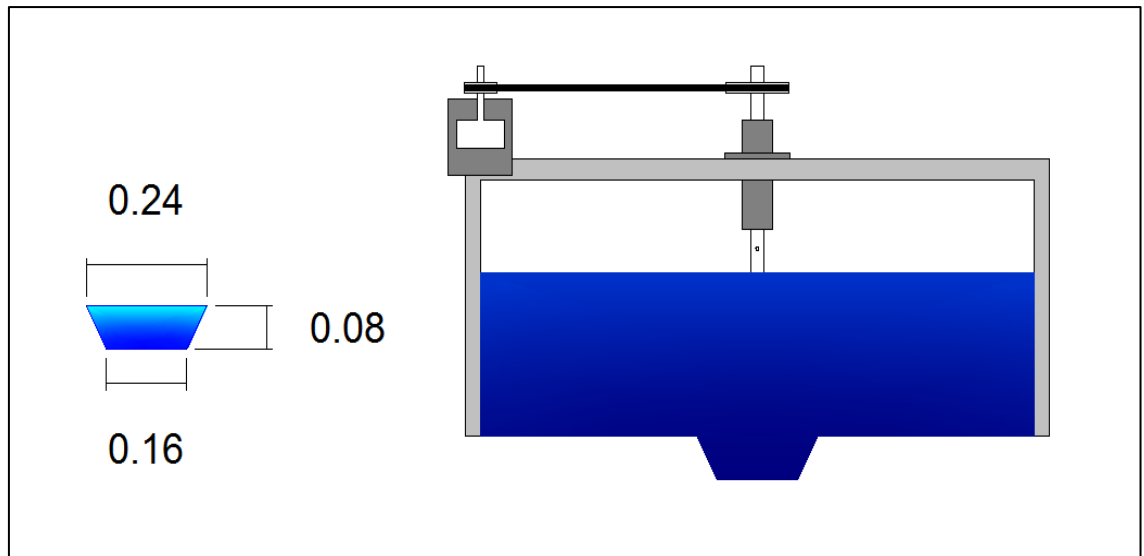


**Figura 92. Ubicación de mejor desempeño; cono uno-turbina dos**

**Fuente:** Los autores.

#### 4.3. Desempeño de grupo de turbinas con cono de descarga número dos

Esta sección expone los datos recopilados en el proceso de prueba del cono número dos, el cual posee un diámetro mayor de 0.24 centímetros.



**Figura 93.** Esquema cono de descarga número dos

**Fuente:** Los autores.

#### 4.3.1. Desempeño de turbina número uno

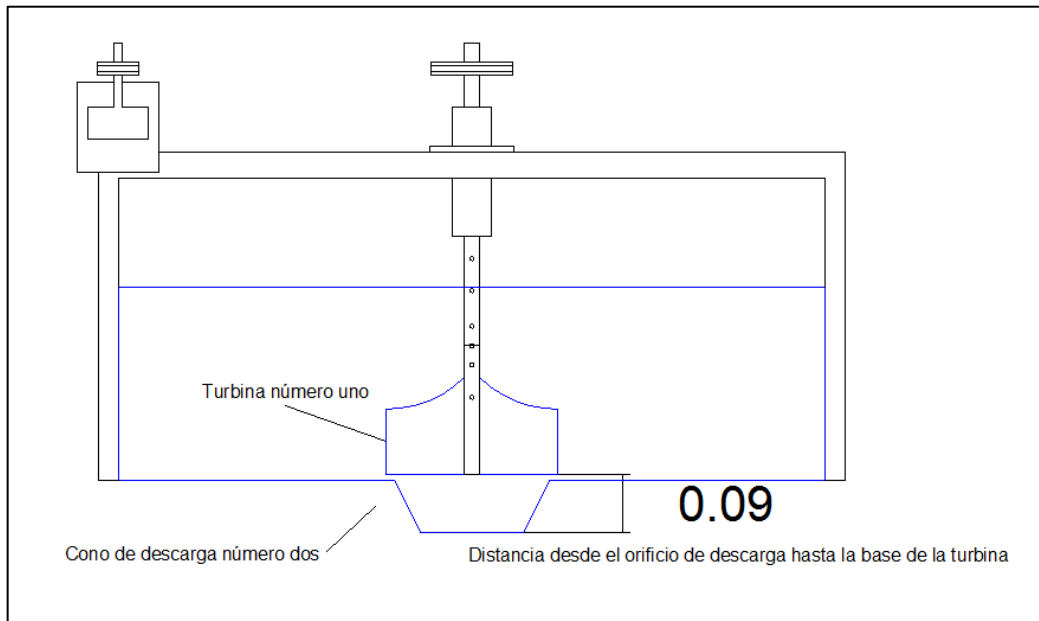


Figura 94. Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono dos-turbina uno

Fuente: Los autores.

Tabla 18. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos) para distintos caudales

$y_c$ (cm)	$y_v$ (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	72	7.54
18	17	9.28	74	7.75
19	18	9.87	76	7.96
20	19	10.48	78	8.17
21	20	11.08	79	8.27
22	21	11.69	81	8.48
23	22	12.31	82	8.59
24	23	12.93	84	8.80
25	24	13.55	85	8.90

Fuente: Los autores.

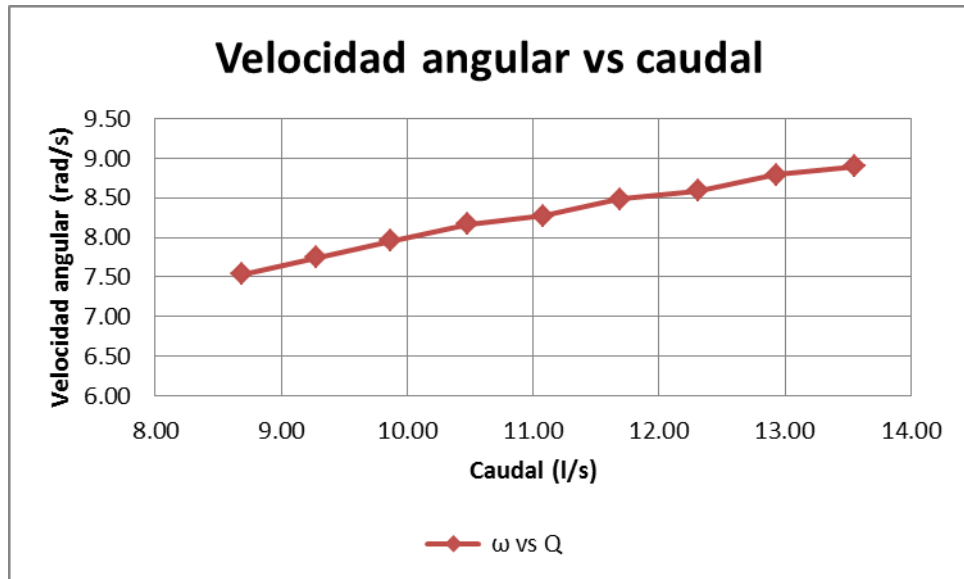


Figura 95. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos

Fuente: Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 8.69 l/s (tirante en canal de entrada de 17 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.

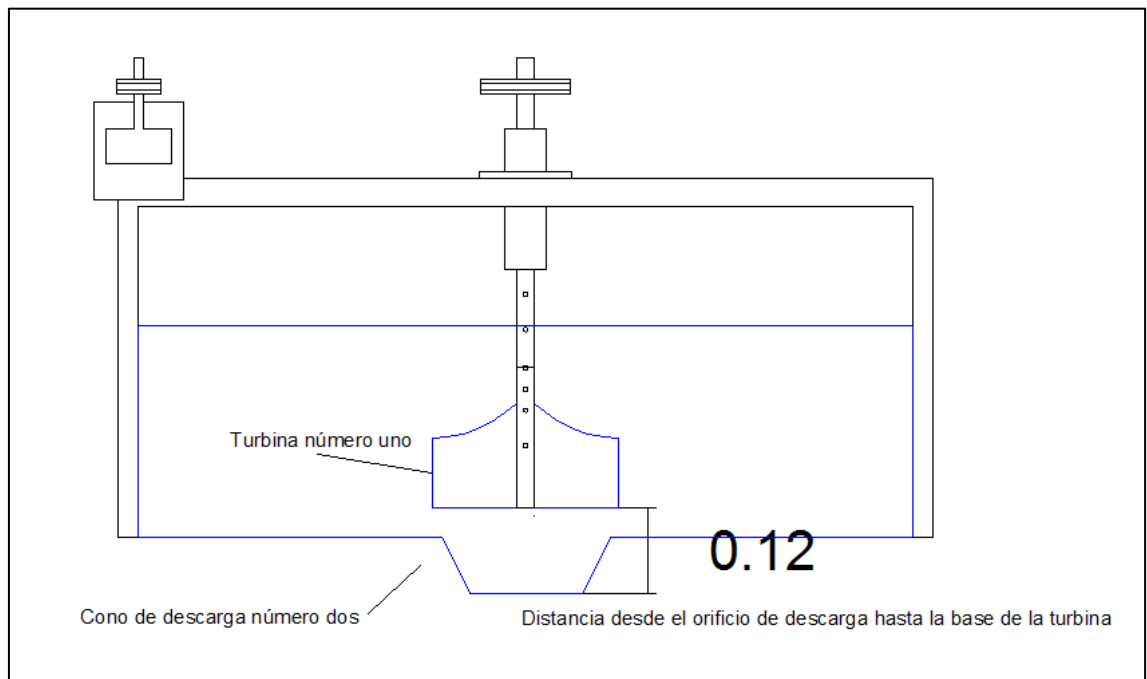


Figura 96. Características de posición para segundo ensayo de desempeño; cono dos-turbina uno

Fuente: Los autores.

Tabla 19. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	-	-
18	17	9.28	40	4.19
19	18	9.87	48	5.03
20	19	10.48	56	5.86
21	20	11.08	65	6.81
22	21	11.69	75	7.85
23	22	12.31	84	8.80
24	23	12.93	98	10.26
25	24	13.55	112	11.73

Fuente: Los autores.

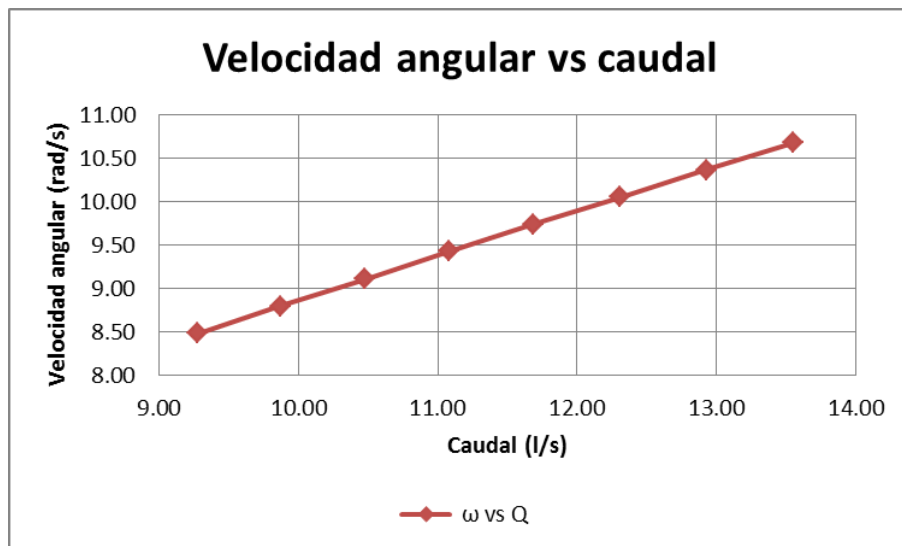
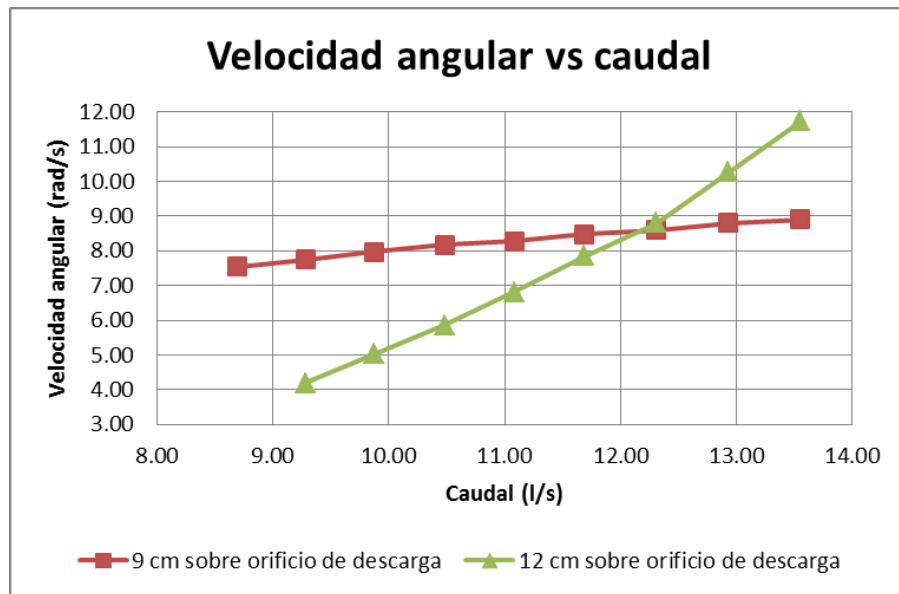


Figura 97. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos

Fuente: Los autores.

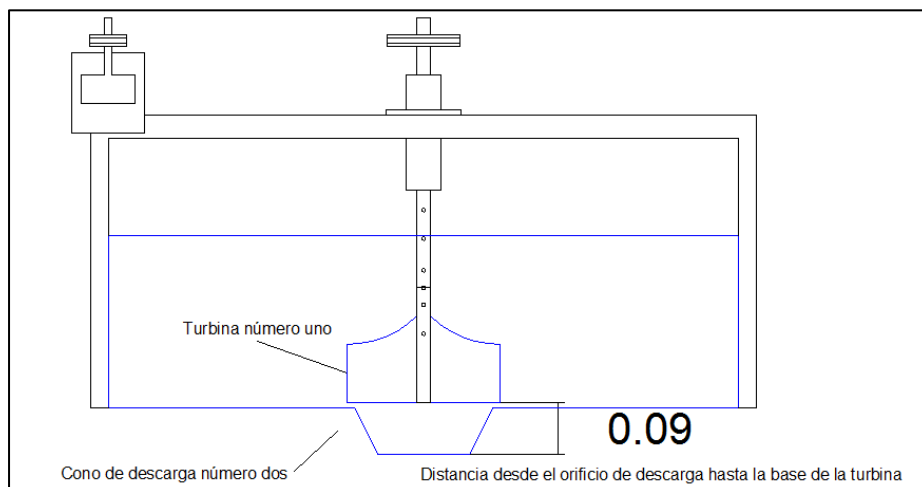
Para caudales de magnitud inferior a 9.28 l/s (tirante en canal de entrada de 18 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



**Figura 98. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos**

**Fuente:** Los autores.

El mejor desempeño de la turbina número uno, con el cono de descarga número dos, se registró cuando su ubicación con respecto al eje vertical fue de 9 cm sobre el orificio de descarga para los caudales desde 9.28 l/s hasta 12.31 l/s; para los caudales sobre este rango el mejor desempeño de la turbina se registró cuando su ubicación con respecto al eje vertical fue de 12 cm sobre el orificio de descarga.



**Figura 99. Ubicación de mejor desempeño; cono dos-turbina uno**

**Fuente:** Los autores.

### 4.3.2. Desempeño de turbina número dos

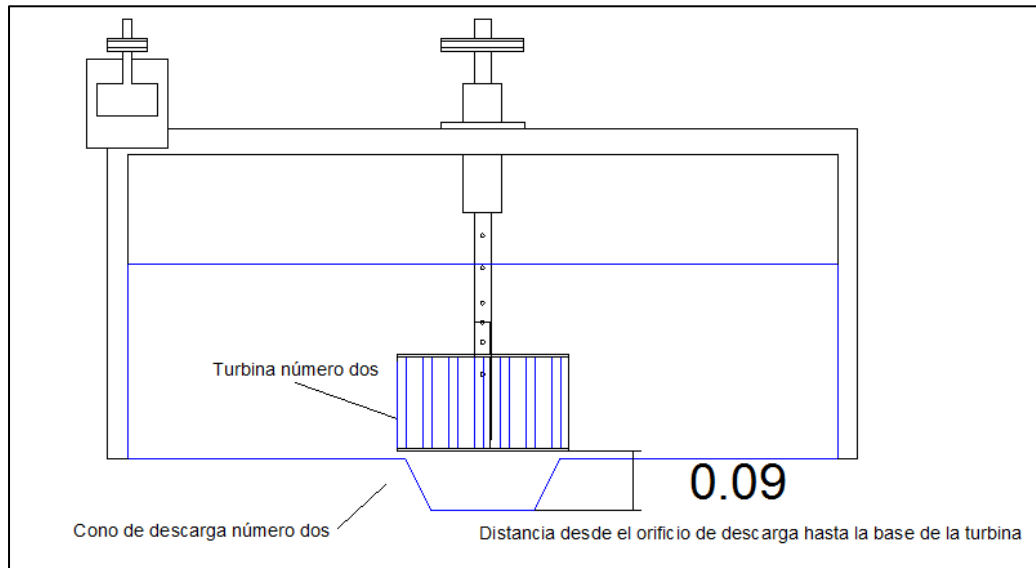


Figura 100. Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono dos-turbina dos

Fuente: Los autores.

Tabla 20. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	27	2.83
18	17	9.28	31	3.25
19	18	9.87	34	3.56
20	19	10.48	39	4.08
21	20	11.08	43	4.50
22	21	11.69	48	5.03
23	22	12.31	53	5.55
24	23	12.93	58	6.07
25	24	13.55	64	6.70

Fuente: Los autores.

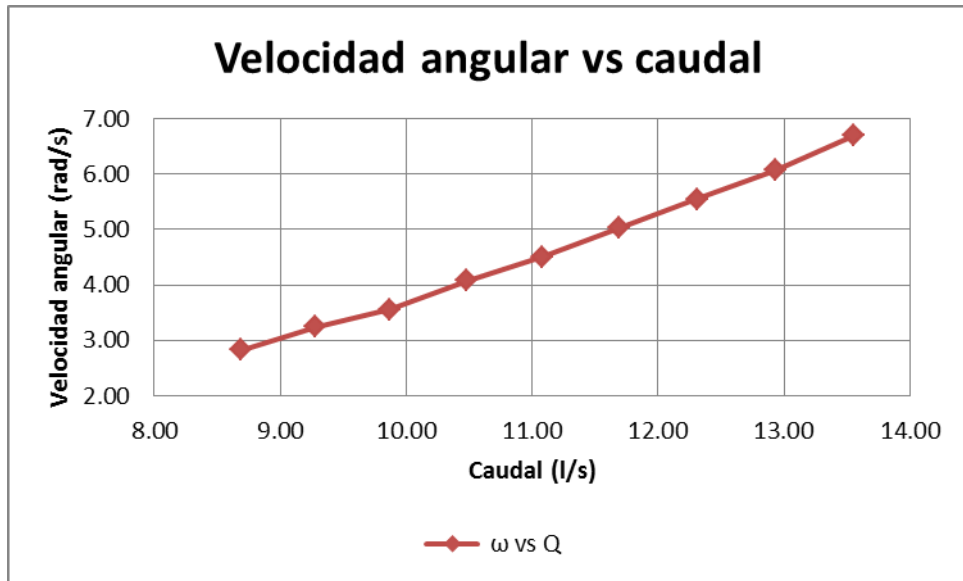


Figura 101. Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos

Fuente: Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 8.69 l/s (tirante en canal de entrada de 17 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.

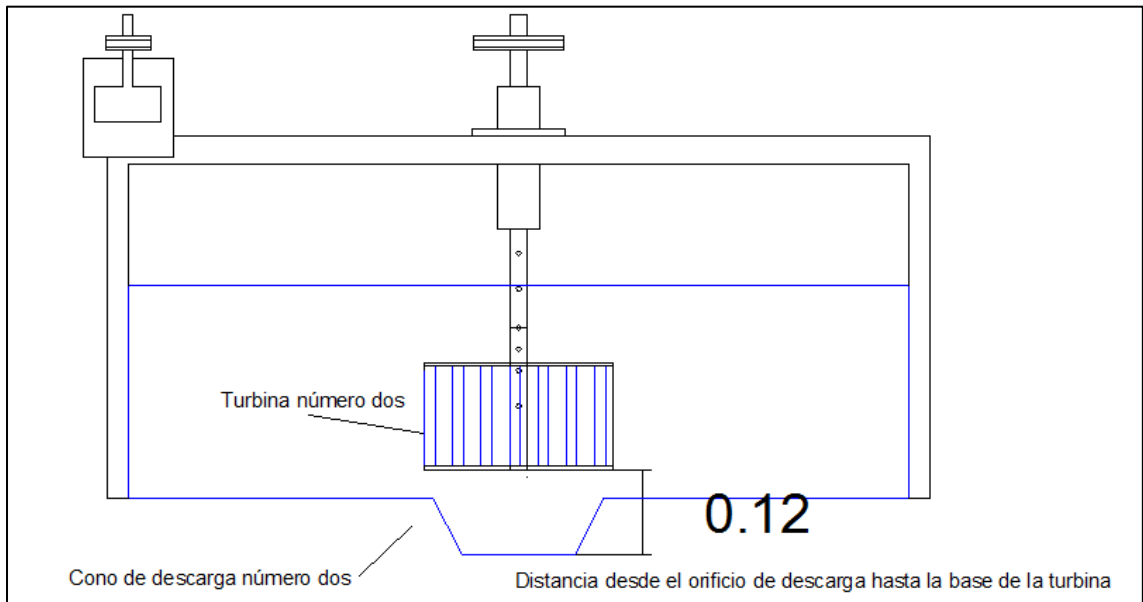


Figura 102. Características de posición para tercer ensayo de desempeño; cono dos-turbina dos

Fuente: Los autores.



Tabla 21. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	-	-
18	17	9.28	32	3.35
19	18	9.87	36	3.77
20	19	10.48	42	4.40
21	20	11.08	48	5.03
22	21	11.69	54	5.65
23	22	12.31	61	6.39
24	23	12.93	69	7.23
25	24	13.55	76	7.96

Fuente: Los autores.

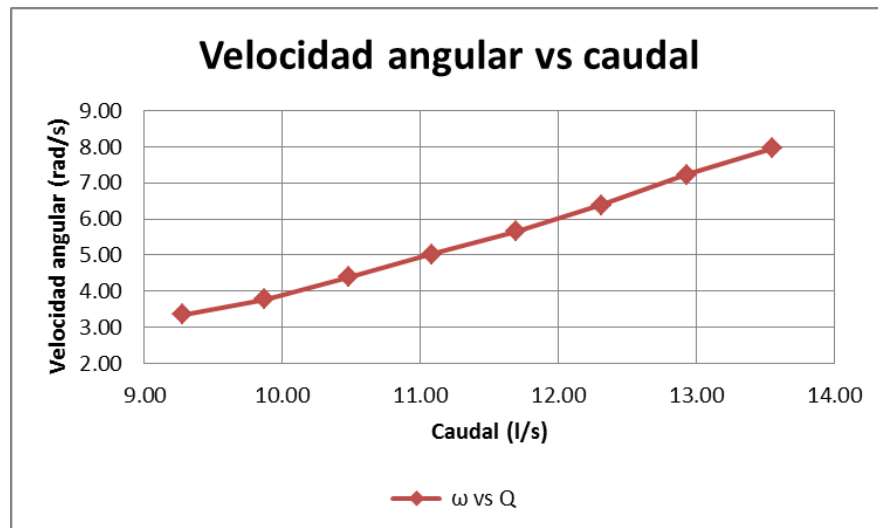
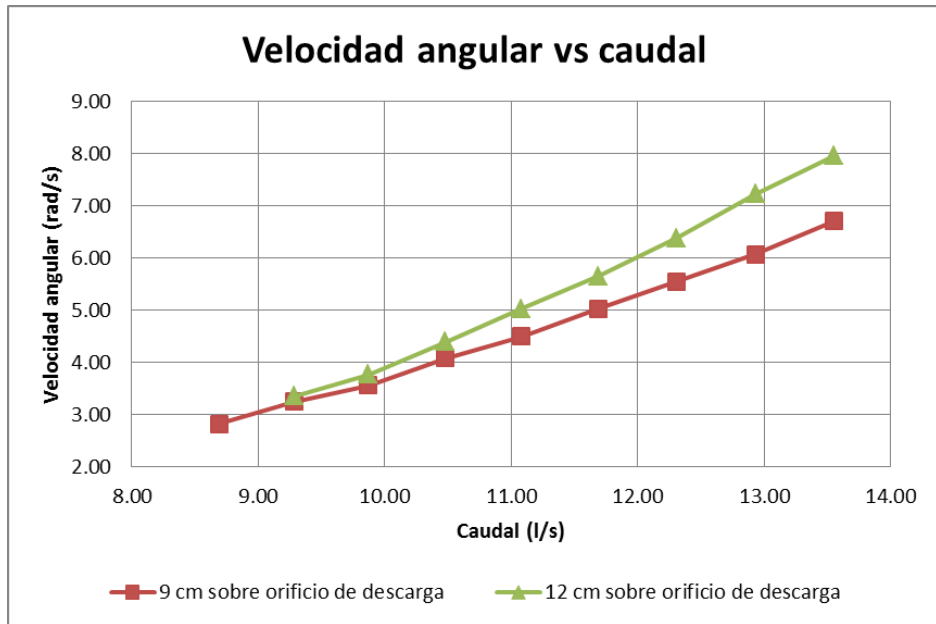


Figura 103. Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos

Fuente: Los autores.

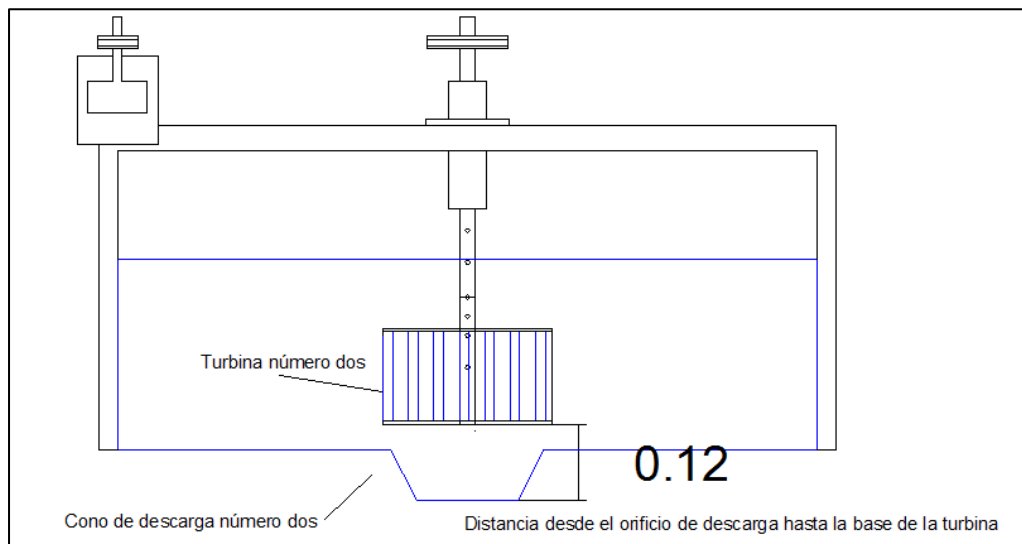
Para caudales de magnitud inferior a 9.28 l/s (tirante en canal de entrada de 18 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



**Figura 104. Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número dos**

**Fuente:** Los autores.

El mejor desempeño de la turbina número dos, con el cono de descarga número dos, se registró cuando su ubicación con respecto al eje vertical fue de 12 cm sobre el orificio de descarga.



**Figura 105. Ubicación de mejor desempeño; cono dos-turbina dos**

**Fuente:** Los autores.

#### 4.4. Desempeño de grupo de turbinas con cono de descarga número tres

Esta sección expone los datos recopilados en el proceso de prueba del cono número tres, el cual posee un diámetro mayor de 0.60 centímetros.

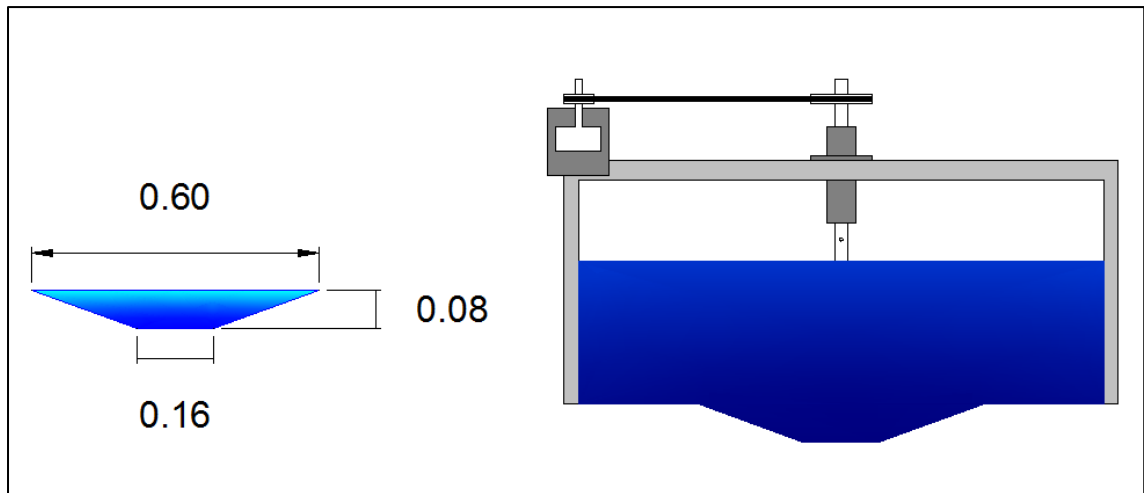


Figura 106. Esquema cono de descarga número tres

Fuente: Los autores.

#### 4.4.1. Desempeño de turbina número uno

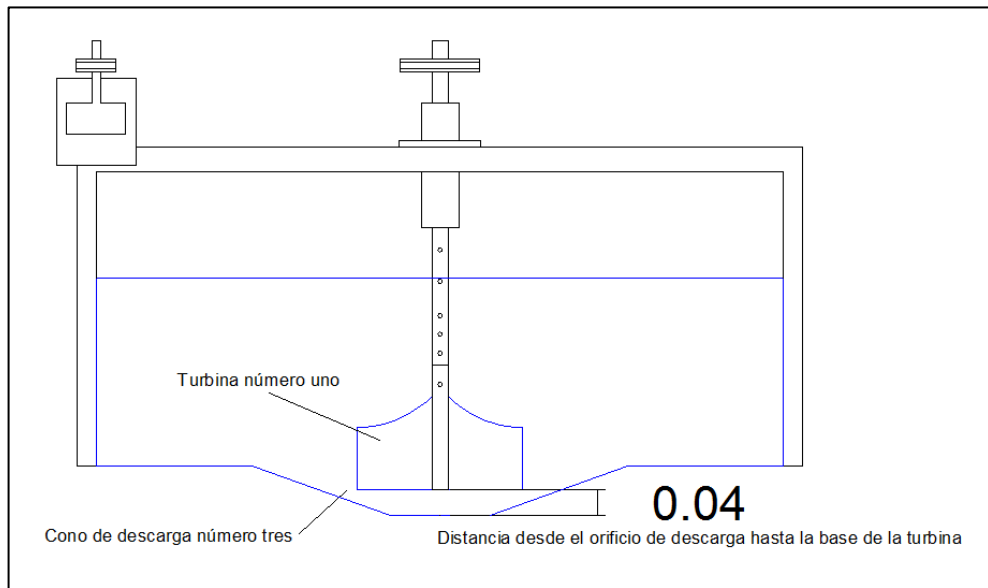


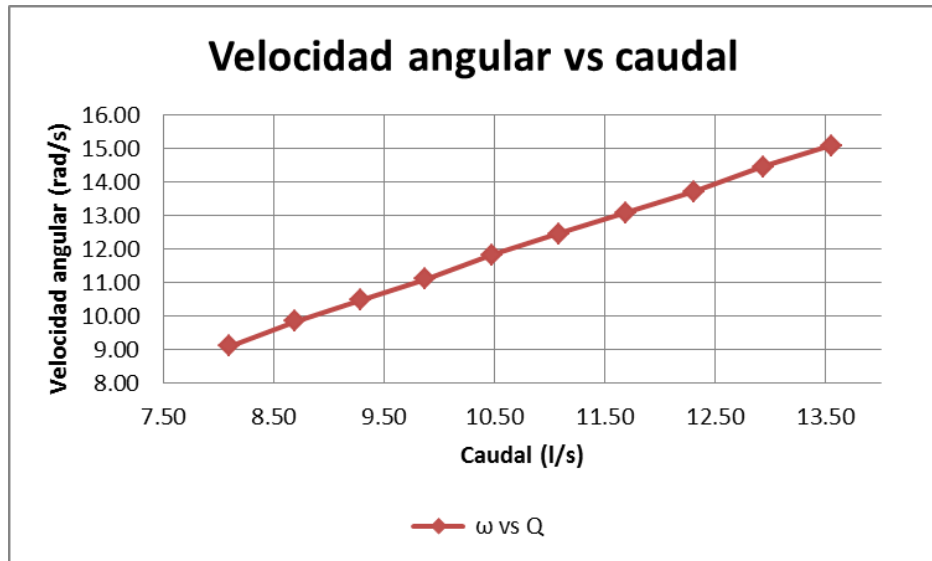
Figura 107. Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono tres-turbina uno

Fuente: Los autores.

Tabla 22. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	87	9.11
17	16	8.69	94	9.84
18	17	9.28	100	10.47
19	18	9.87	106	11.10
20	19	10.48	113	11.83
21	20	11.08	119	12.46
22	21	11.69	125	13.09
23	22	12.31	131	13.72
24	23	12.93	138	14.45
25	24	13.55	144	15.08

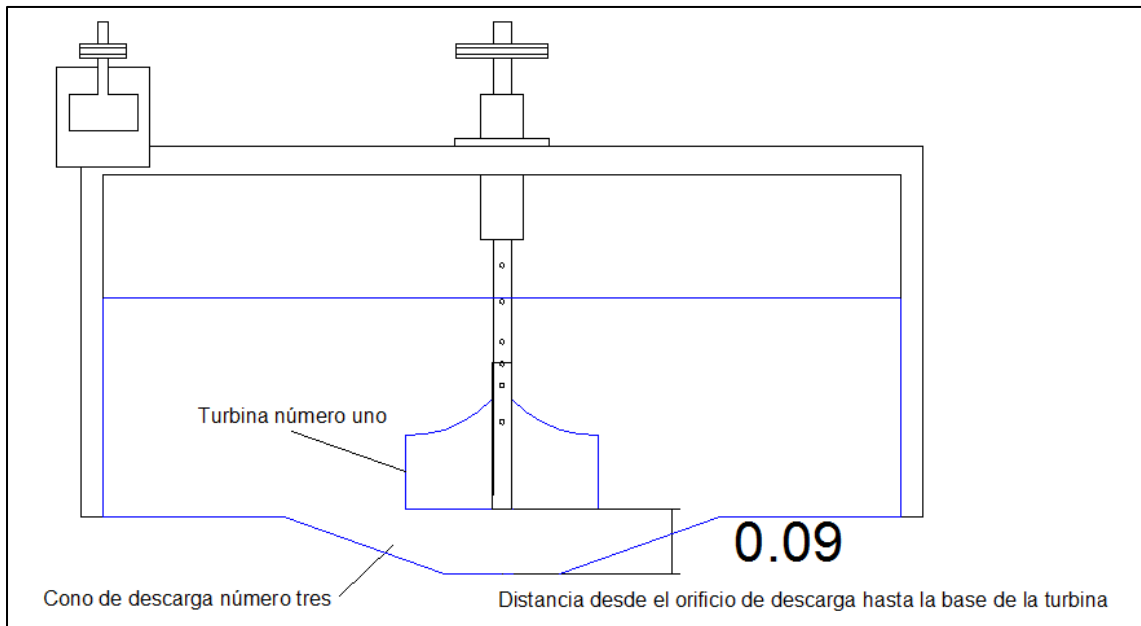
Fuente: Los autores.



**Figura 108. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres**

**Fuente:** Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 8.10 l/s (tirante en canal de entrada de 16 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



**Figura 109. Características de posición para segundo ensayo de desempeño; cono tres-turbina uno**

**Fuente:** Los autores.

Tabla 23. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	73	7.64
18	17	9.28	79	8.27
19	18	9.87	84	8.80
20	19	10.48	89	9.32
21	20	11.08	100	10.47
22	21	11.69	101	10.58
23	22	12.31	106	11.10
24	23	12.93	112	11.73
25	24	13.55	118	12.36

Fuente: Los autores.

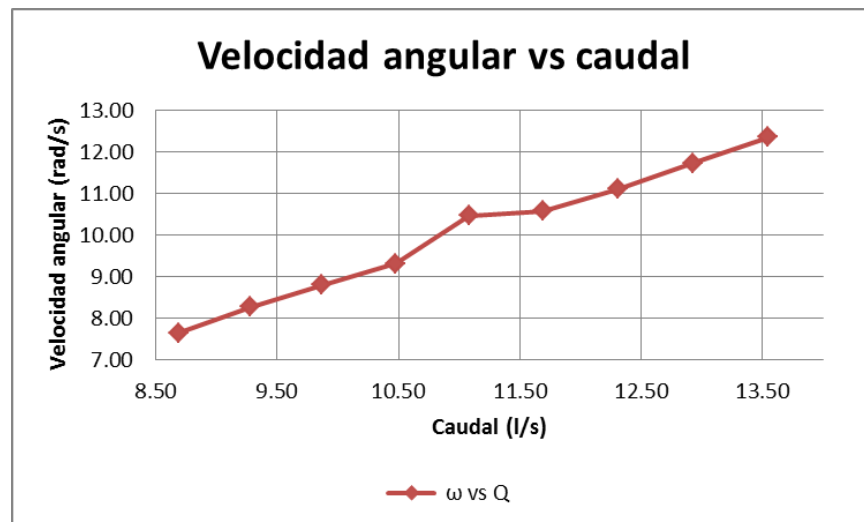
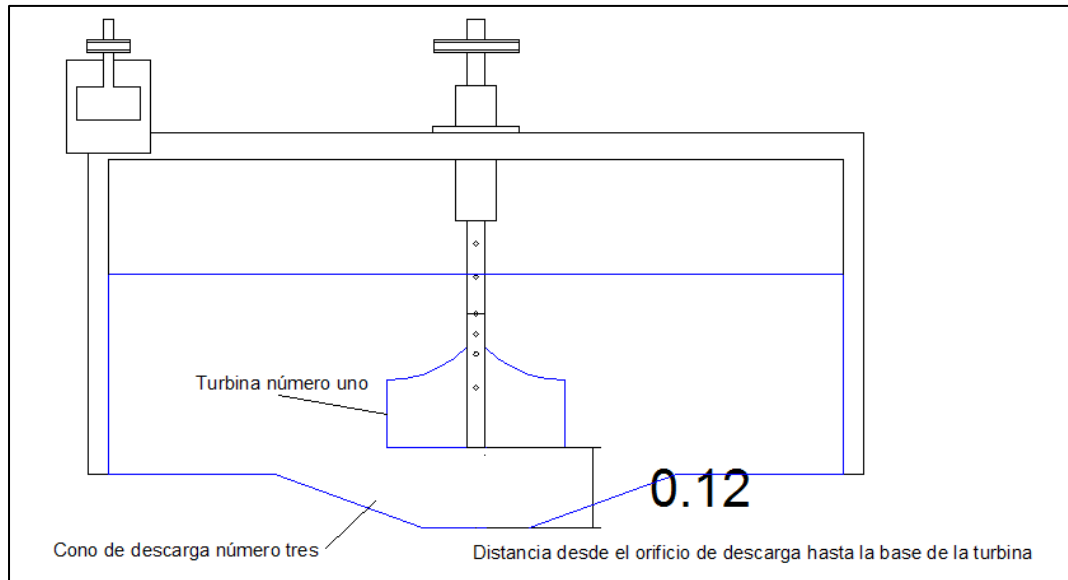


Figura 110. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

Fuente: Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 8.69 l/s (tirante en canal de entrada de 17 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



**Figura 111. Características de posición para tercer ensayo de desempeño; cono tres-turbina uno**

**Fuente:** Los autores.

**Tabla 24. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales**

$y_c$ (cm)	$y_v$ (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	-	-
18	17	9.28	-	-
19	18	9.87	52	5.45
20	19	10.48	60	6.28
21	20	11.08	69	7.23
22	21	11.69	79	8.27
23	22	12.31	90	9.42
24	23	12.93	101	10.58
25	24	13.55	113	11.83

**Fuente:** Los autores.

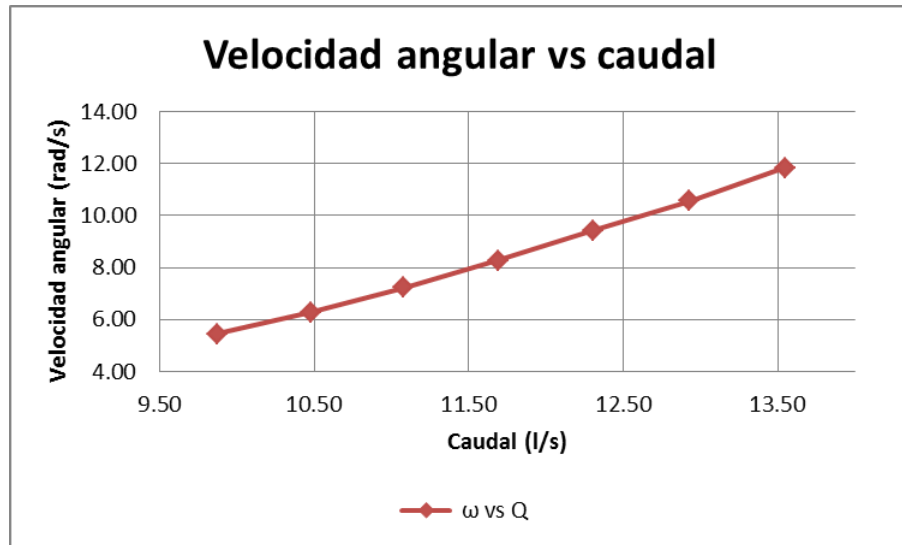


Figura 112. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

Fuente: Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 9.87 l/s (tirante en canal de entrada de 19 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.

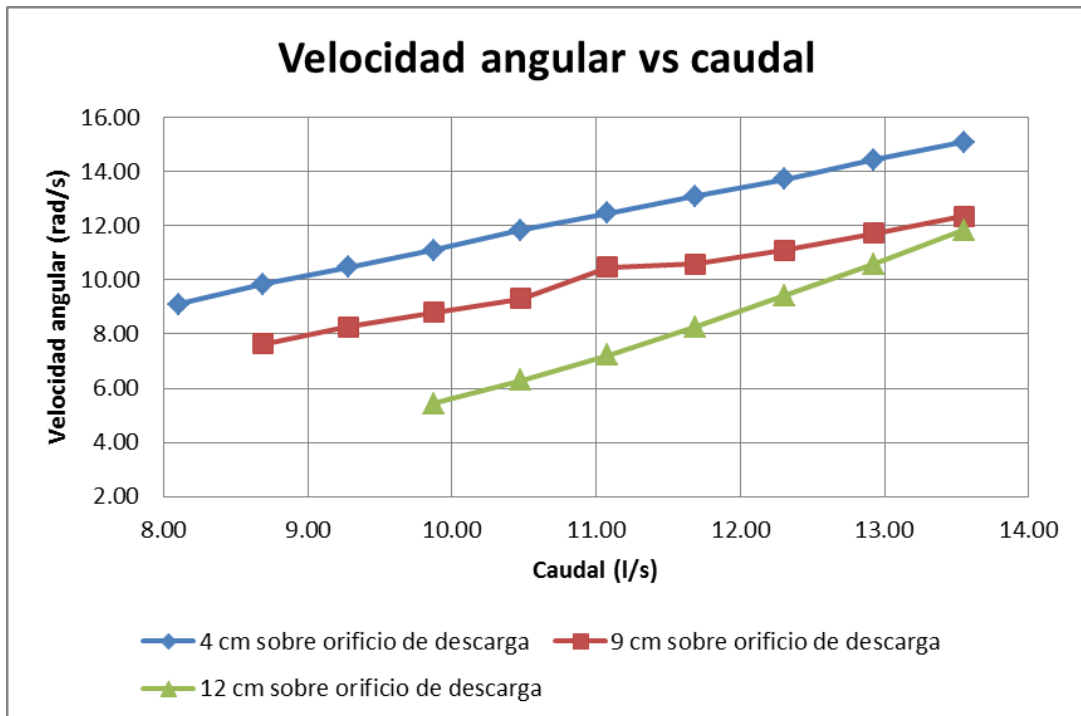
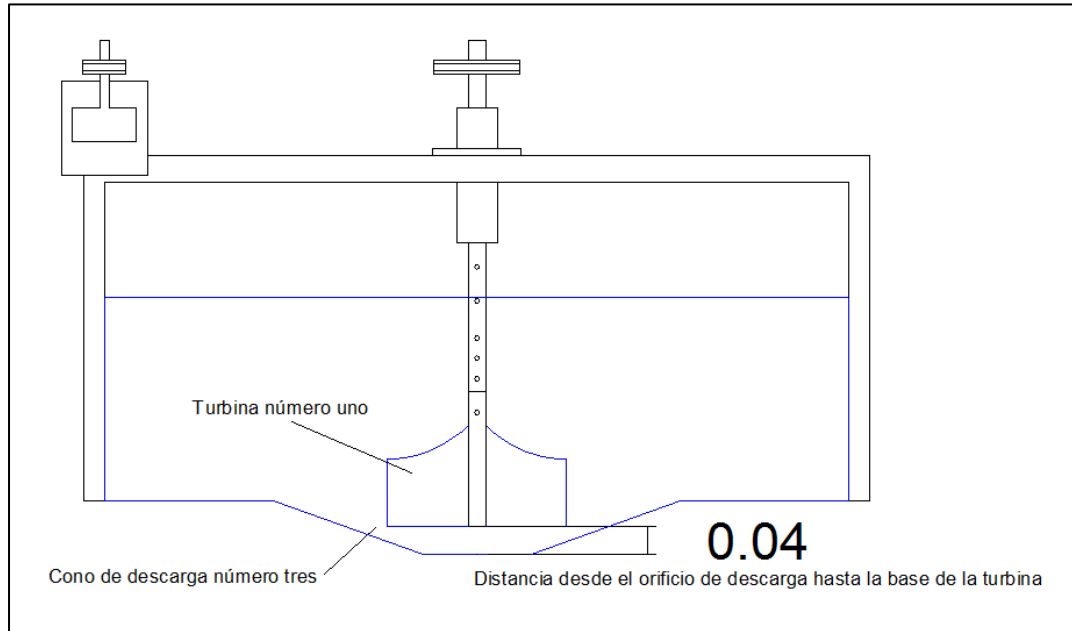


Figura 113. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 4 cm, 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

Fuente: Los autores.



El mejor desempeño de la turbina número uno, con el cono de descarga número tres, se registró cuando su ubicación con respecto al eje vertical fue de 4 cm sobre el orificio de descarga.



**Figura 114. Ubicación de mejor desempeño; cono tres-turbina uno**

**Fuente:** Los autores.

#### 4.4.2. Desempeño de turbina número dos

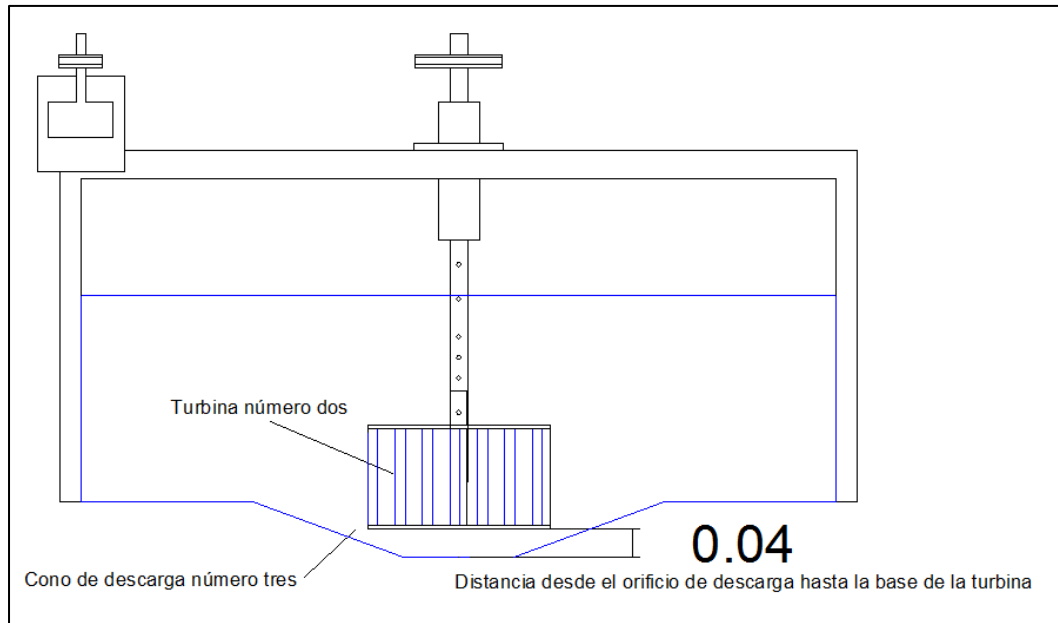


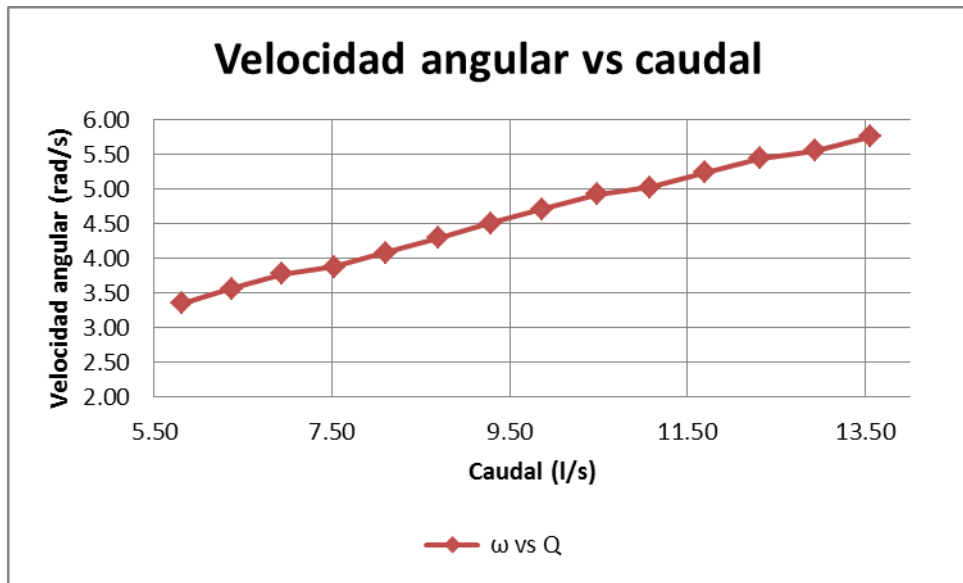
Figura 115. Características de posición para primer ensayo de desempeño; cono tres-turbina dos

Fuente: Los autores.

Tabla 25. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	32	3.35
13	12	6.37	34	3.56
14	13	6.94	36	3.77
15	14	7.52	37	3.87
16	15	8.10	39	4.08
17	16	8.69	41	4.29
18	17	9.28	43	4.50
19	18	9.87	45	4.71
20	19	10.48	47	4.92
21	20	11.08	48	5.03
22	21	11.69	50	5.24
23	22	12.31	52	5.45
24	23	12.93	53	5.55
25	24	13.55	55	5.76

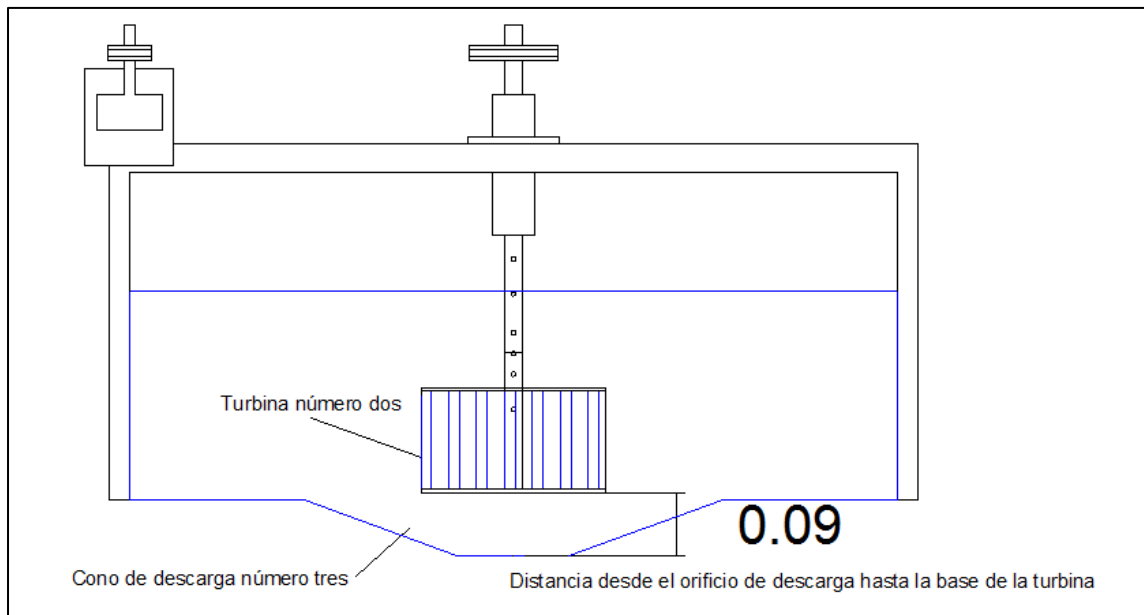
Fuente: Los autores.



**Figura 116. Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres**

**Fuente:** Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 5.81 l/s (tirante en canal de entrada de 12 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



**Figura 117. Características de posición para segundo ensayo de desempeño; cono tres-turbina dos**

**Fuente:** Los autores.

Tabla 26. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	-	-
18	17	9.28	57	5.97
19	18	9.87	57	5.97
20	19	10.48	57	5.97
21	20	11.08	57	5.97
22	21	11.69	57	5.97
23	22	12.31	57	5.97
24	23	12.93	57	5.97
25	24	13.55	57	5.97

Fuente: Los autores.

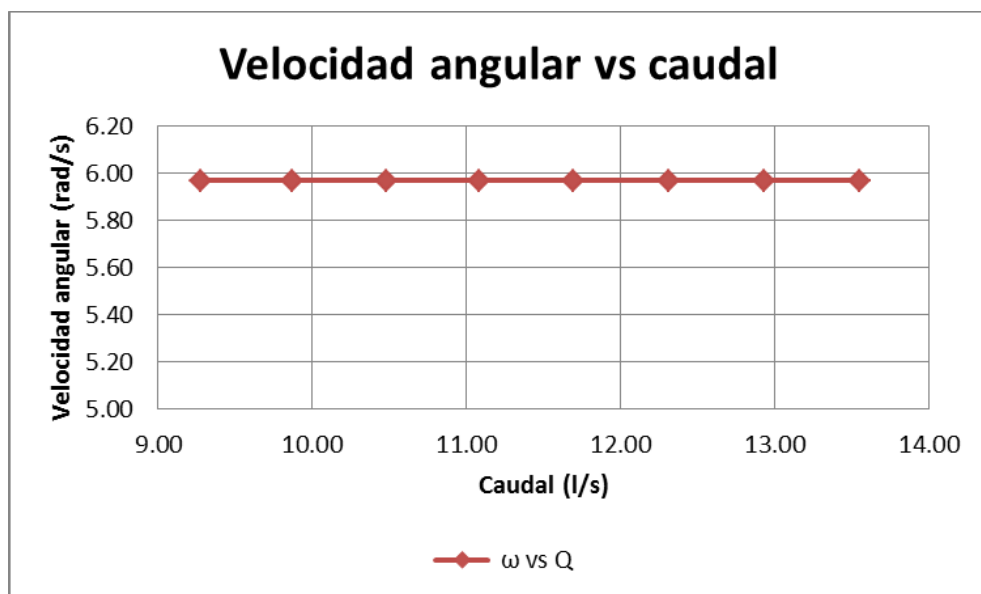
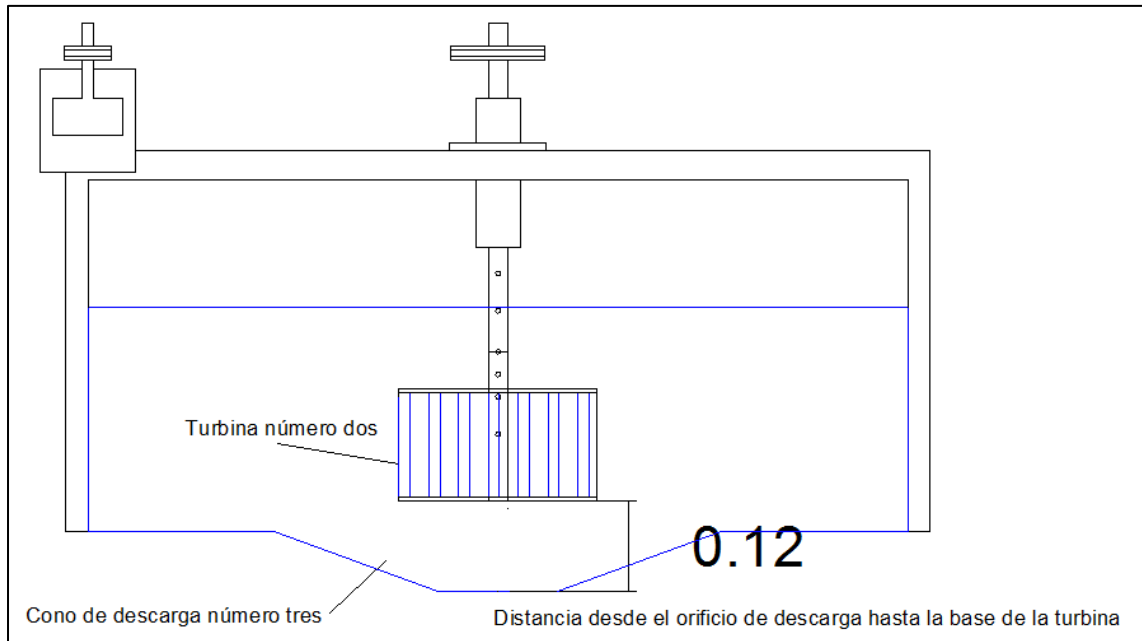


Figura 118. Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres

Fuente: Los autores.

Para caudales de magnitud inferior a 9.28 l/s (tirante en canal de entrada de 18 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



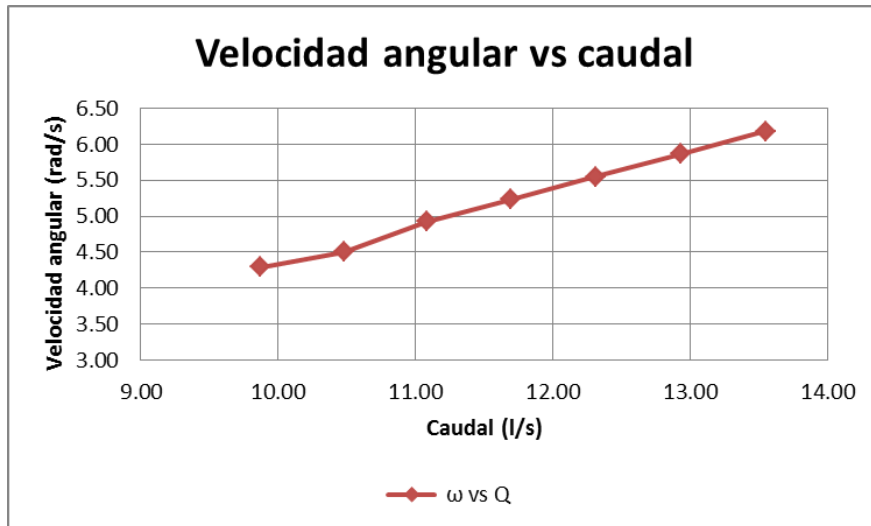
**Figura 119. Características de posición para tercer ensayo de desempeño; cono tres-turbina dos**

**Fuente:** Los autores.

**Tabla 27. Tirante en canal de entrada, tirante en periferia de vórtice, y velocidad angular de turbina número dos (ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres) para distintos caudales**

$y_c$ (cm)	$y_v$ (cm)	$Q$ (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)
10	9	4.71	-	-
11	10	5.26	-	-
12	11	5.81	-	-
13	12	6.37	-	-
14	13	6.94	-	-
15	14	7.52	-	-
16	15	8.10	-	-
17	16	8.69	-	-
18	17	9.28	-	-
19	18	9.87	41	4.29
20	19	10.48	43	4.50
21	20	11.08	47	4.92
22	21	11.69	50	5.24
23	22	12.31	53	5.55
24	23	12.93	56	5.86
25	24	13.55	59	6.18

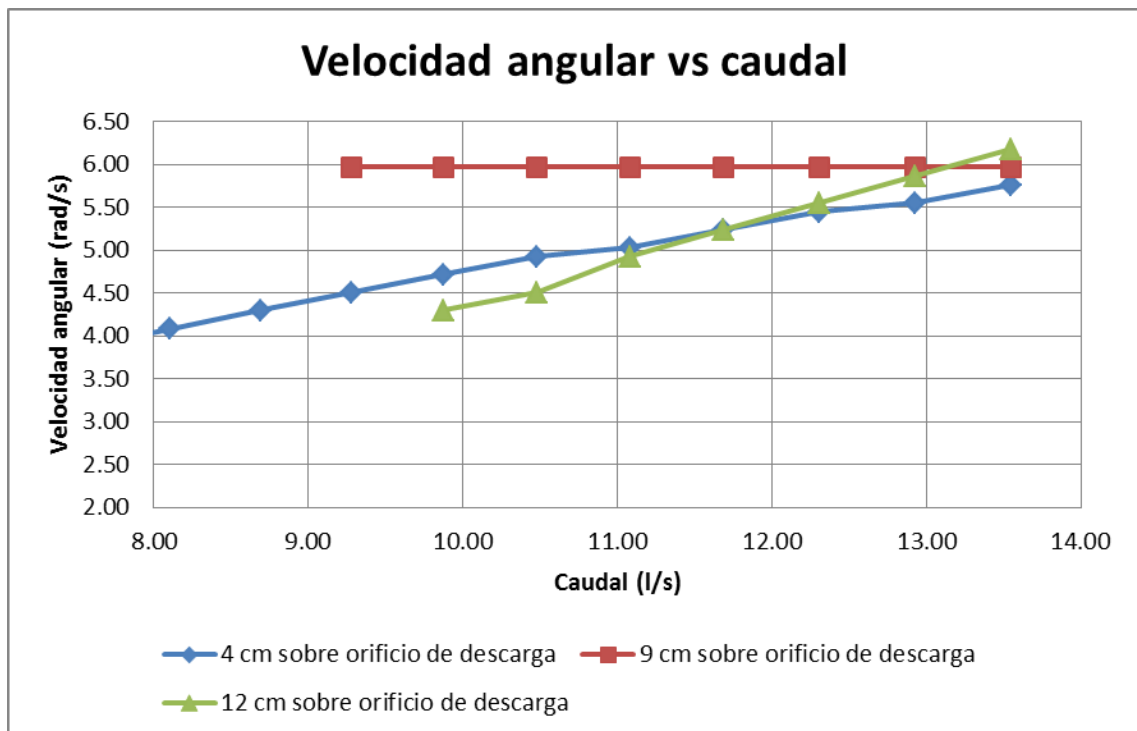
**Fuente:** Los autores.



**Figura 120. Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres**

Fuente: Los autores.

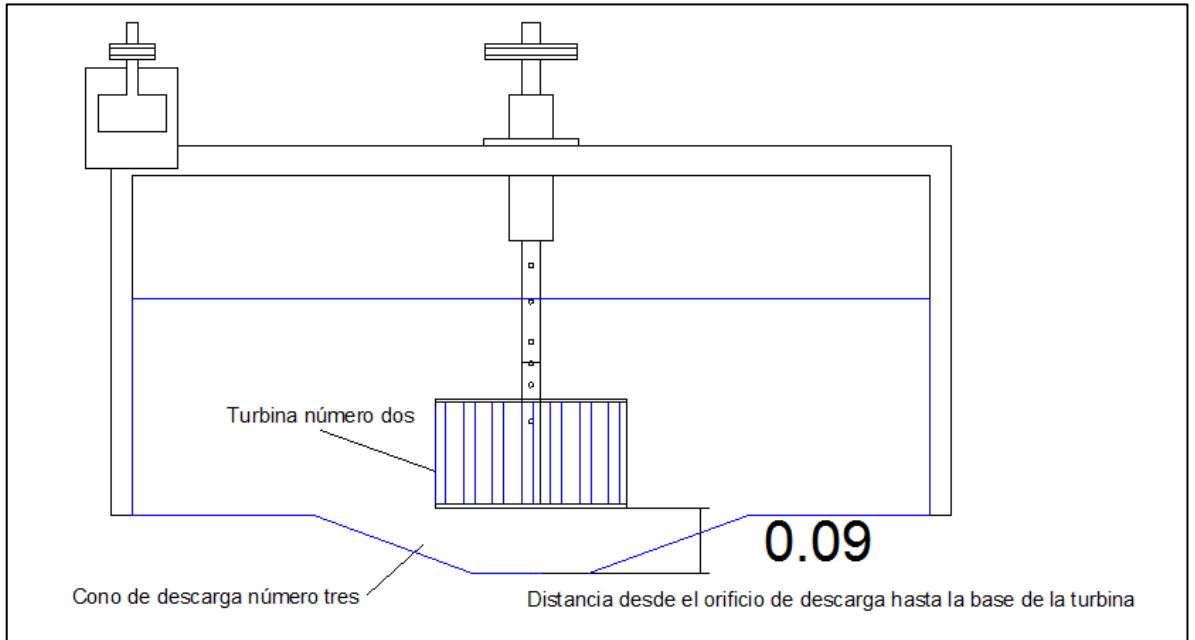
Para caudales de magnitud inferior a 10.48 l/s (tirante en canal de entrada de 19 cm) no se evidenció movimiento de la turbina.



**Figura 121. Velocidad angular vs caudal; turbina número dos ubicada a 4 cm, 9 cm y 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres**

Fuente: Los autores.

El mejor desempeño de la turbina número dos, con el cono de descarga número tres, se registró cuando su ubicación con respecto al eje vertical fue de 9 cm sobre el orificio de descarga.



**Figura 122. Ubicación de mejor desempeño; cono tres-turbina dos**

**Fuente:** Los autores.

#### 4.5. Evaluación de influencia de cono de descarga

Para evaluar la influencia de cono de descarga, en la variabilidad de la velocidad angular del vórtice gravitacional hidráulico, se realizó un análisis comparativo fundamentado en el desempeño de la turbina número uno.

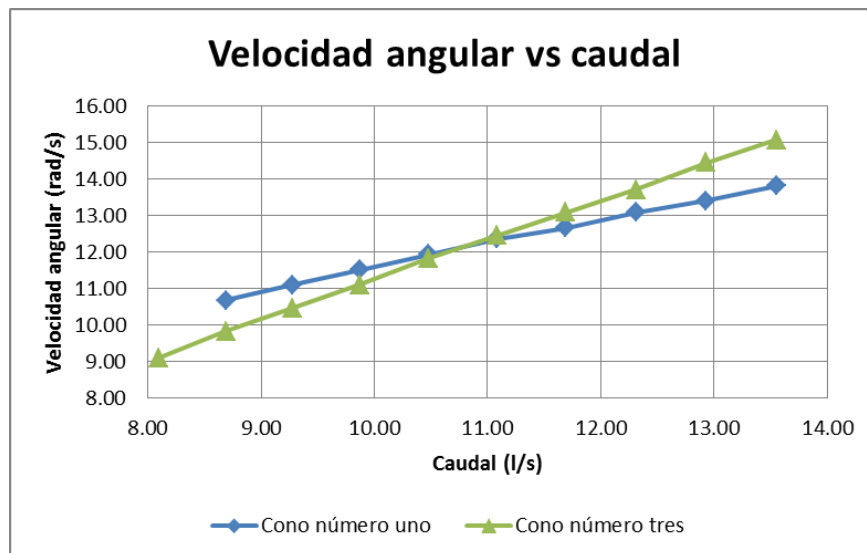


Figura 123. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno y cono número tres

Fuente: Los autores.

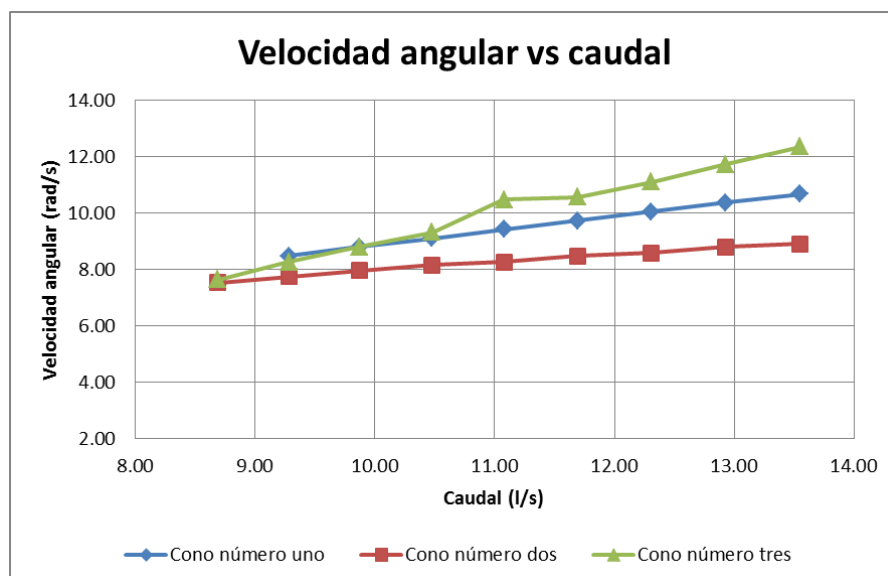
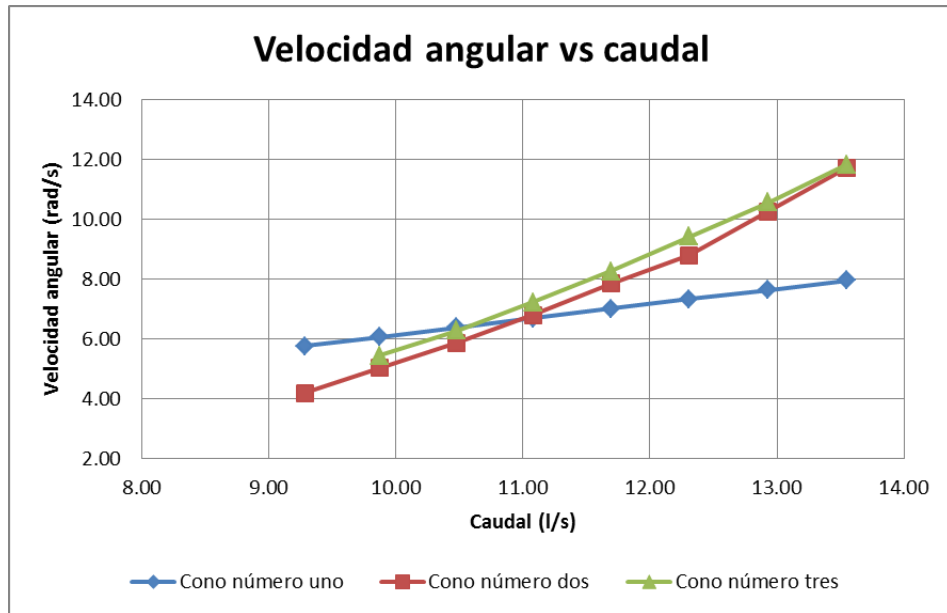


Figura 124. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 9 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno, cono número dos y cono número tres

Fuente: Los autores.





**Figura 125. Velocidad angular vs caudal; turbina número uno ubicada a 12 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno, cono número dos y cono número tres**

**Fuente:** Los autores.

Los mayores valores de velocidad angular fueron registrados cuando la ubicación de la turbina número uno, con respecto al eje vertical, fue de 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número tres. Además, los valores de velocidad angular de la zona central del vórtice hidráulico, tienden a incrementar en función del aumento, de la dimensión, del diámetro mayor del cono de descarga.

#### 4.6. Incremento en velocidad de flujo

Datos punto de estudio a; 1.20 m previo a la entrada del tanque de circulación

Tabla 28. Velocidad lineal para distintos caudales en canal de entrada

yc (m)	Q (l/s)	V (m/s)
0.10	4.71	0.16
0.11	5.26	0.16
0.12	5.81	0.16
0.13	6.37	0.16
0.14	6.94	0.17
0.15	7.52	0.17
0.16	8.10	0.17
0.17	8.69	0.17
0.18	9.28	0.17
0.19	9.87	0.17
0.20	10.48	0.17
0.21	11.08	0.18
0.22	11.69	0.18
0.23	12.31	0.18
0.24	12.93	0.18
0.25	13.55	0.18

Fuente: Los autores.

Se determina una velocidad promedio para los caudales en el rango de 10.48 l/s a 13.55 l/s. Por tanto, para el canal de entrada se tiene:

$$V_{PROMEDIO} = 0.18 \text{ m/s}$$

Datos punto de estudio b; radio de 22 cm con respecto al centro del tanque de circulación

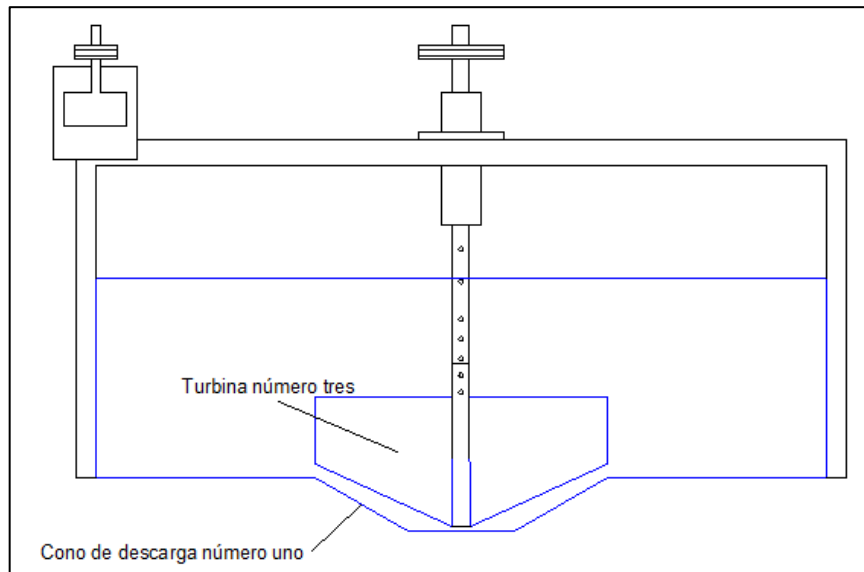


Figura 126. Ubicación para ensayo de turbina número tres; cono de descarga número uno

Fuente: Los autores

Tabla 29. Tirante en canal de entrada; velocidad angular de turbina número tres (ubicada sobre el orificio de descarga del cono número uno); radio de trabajo de turbina y velocidad lineal para distintos caudales

yc (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	r (m)	V (m/s)
10	4.71	-	-	0.22	-
11	5.26	-	-	0.22	-
12	5.81	-	-	0.22	-
13	6.37	-	-	0.22	-
14	6.94	51	5.34	0.22	1.17
15	7.52	53	5.55	0.22	1.22
16	8.10	56	5.86	0.22	1.29
17	8.69	58	6.07	0.22	1.34
18	9.28	61	6.39	0.22	1.41
19	9.87	63	6.60	0.22	1.45
20	10.48	65	6.81	0.22	1.50
21	11.08	67	7.02	0.22	1.54
22	11.69	70	7.33	0.22	1.61
23	12.31	72	7.54	0.22	1.66
24	12.93	74	7.75	0.22	1.70
25	13.55	76	7.96	0.22	1.75

Fuente: Los autores.

Se determinó una velocidad promedio para los caudales en el rango de 10.48 l/s a 13.55 l/s. Por tanto para un radio (con respecto al centro del tanque de circulación) de 22 cm se tiene:

$$V_{PROMEDIO} = 1.63 \text{ m/s}$$

**Datos punto de estudio c; radio de 13 cm con respecto al centro del tanque de circulación**

**Tabla 30. Tirante en canal de entrada; velocidad angular de turbina número uno (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno); radio de trabajo de turbina y velocidad lineal para distintos caudales**

yc (cm)	Q (l/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	r (m)	V (m/s)
10	4.71	-	-	0.13	-
11	5.26	-	-	0.13	-
12	5.81	-	-	0.13	-
13	6.37	-	-	0.13	-
14	6.94	-	-	0.13	-
15	7.52	-	-	0.13	-
16	8.10	-	-	0.13	-
17	8.69	102	10.68	0.13	1.39
18	9.28	106	11.10	0.13	1.44
19	9.87	110	11.52	0.13	1.50
20	10.48	114	11.94	0.13	1.55
21	11.08	118	12.36	0.13	1.61
22	11.69	121	12.67	0.13	1.65
23	12.31	125	13.09	0.13	1.70
24	12.93	128	13.40	0.13	1.74
25	13.55	132	13.82	0.13	1.80

Fuente: Los autores.

Se determina una velocidad promedio para los caudales en el rango de 10.48 l/s a 13.55 l/s. Por tanto para un radio con respecto al centro del tanque de circulación) de 13 cm se tiene:

$$V_{PROMEDIO} = 1.67 \text{ m/s}$$

La velocidad final adquirida por el flujo, previo a la zona de descarga fue de 1.67 m/s, mientras que la velocidad del flujo en el canal de entrada (previo a la transición, y por ende al tanque de circulación) fue de 0.18 m/s. Por tanto, La implementación de una estructura de vórtice gravitacional con las características geométricas presentadas en esta investigación, incrementa la velocidad de flujo 9.28 veces.

#### 4.7. Voltaje generado y eficiencia del sistema a escala

**Tabla 31. Potencia generada por turbina número uno (ubicada a 4 cm sobre el orificio de descarga del cono número uno)**

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	rpm (turbina)	rpm (generador)	P (Watt)
20	19	10.48	48	120	5.13
21	20	11.08	53	133	5.19
22	21	11.69	59	148	5.26
23	22	12.31	64	160	5.32
24	23	12.93	70	175	5.40
25	24	13.55	76	190	5.48

Fuente: Los autores.

**Tabla 32. Potencia generada por turbina número tres (ubicada sobre el orificio de descarga del cono número uno)**

yc (cm)	yv (cm)	Q (l/s)	rpm (turbina)	rpm (generador)	P (Watt)
20	19	10.48	56	140	5.03
21	20	11.08	60	150	5.14
22	21	11.69	63	158	5.24
23	22	12.31	66	165	5.35
24	23	12.93	69	173	5.44
25	24	13.55	72	180	5.54

Fuente: Los autores.

**Tabla 33. Potencia teórica para turbinas uno y tres**

Turbina		r (m)	$\omega$ (rad/s)	Zv (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	g (m/s <sup>2</sup> )	Q (l/s)	Potencia Watt
Nº	Diámetro de trabajo (m)							
Uno	0.26	0.13	13.82	0.165	1000	9.81	13.55	21.87
Tres	0.44	0.22	7.96	0.156	1000	9.81	13.55	20.78

Fuente: Los autores

**Tabla 34. Eficiencia turbinas uno y tres**

Turbina	Q (l/s)	P teórica (Watt)	P medida (Watt)	Eficiencia (%)
Uno	13.55	21.87	5.48	25.06
Tres	13.55	20.78	5.54	26.66

Fuente: Los autores

A través de la turbina número tres se alcanzó una eficiencia de 26.66% lo cual es un valor aceptable al considerar las características técnicas del generador utilizado, el cual fue diseñado y fabricado para operar de manera óptima bajo condiciones de mayor carga neta y mayor número de revoluciones.

## CONCLUSIONES

- Se desarrolló el diseño y estudio experimental de las características geométricas de una estructura que tenga la capacidad de inducir artificialmente un vórtice gravitacional hidráulico, cuyo movimiento rotacional pueda ser aprovechado para generar electricidad.
- El vórtice formado en las condiciones de laboratorio, al parecer, se aproxima a las características de un vórtice compuesto, en donde, la zona central del vórtice tiene tendencia a rotar como un sólido respecto a un eje, mientras que el flujo que lo rodea se comporta como un vórtice libre generado por el ingreso tangencial del agua al tanque de circulación.
- La estructura diseñada posee la ventaja constructiva de causar la menor perturbación al flujo de aproximación al tanque de circulación, lo que garantiza un ingreso de agua controlado y sin turbulencias considerables. Además, desde el punto de vista práctico, el fondo cónico incorporado a la estructura del tanque de circulación facilita una descarga directa, ya que, no permite una recirculación de flujo en el fondo del tanque.
- Al analizar las condiciones de formación del vórtice hidráulico, en todos los ensayos realizados, se determinó que la altura de la lámina de agua en el canal de entrada, debe ser aproximadamente el 75% de la altura del tanque de circulación. De esta manera se garantiza una óptima funcionalidad del sistema.
- La incorporación del cono de descarga, a la estructura del tanque de circulación, resultó beneficiosa para el sistema en general, ya que, los valores de velocidad angular de la zona central del vórtice hidráulico, tienden a incrementar en función del aumento de la dimensión del diámetro mayor del cono.
- La estructura diseñada es adecuada y aplicable a las condiciones de entorno ambiental que nos rodea, ya que al comprobar su funcionalidad para generar energía con una velocidad de entrada de 0.18 m/s y una carga hidráulica inferior a 25 cm, se convierte en una alternativa altamente viable para la producción descentralizada de energía renovable.
- En función del diámetro de trabajo, características geométricas, dimensiones y desempeño, la turbina más adecuada para el sistema de vórtice gravitacional, en el marco de la investigación realizada, fue la turbina número uno.

- Al comparar el vórtice formado con la presencia de las turbinas uno y dos, con el formado a través del uso de la turbina número tres, se puede concluir que el diámetro de trabajo de la turbina tres, a pesar de su funcionalidad, no es adecuado si se quiere evitar perturbaciones del flujo rotacional.
- Actualmente, la máxima eficiencia del modelo a escala implementado en el laboratorio de hidráulica de la UTP, es de 26.66%, posiblemente debido a inconvenientes referentes a los parámetros de aplicación del generador utilizado.



## RECOMENDACIONES

- Realizar el diseño especializado de un modelo de turbina aplicable al sistema de vórtice gravitacional.
- Ejecutar el estudio y diseño de un generador compacto, que pueda ser adaptado, en forma directa, sobre el eje principal del módulo de transmisión.
- Realizar un estudio que determine la influencia de la velocidad de entrada en la formación del vórtice.
- Diseñar y estudiar nuevas características geométricas para el tanque de circulación, como puede ser el caso de un tanque semiesférico.
- Explorar nuevas tecnologías de generación hidroeléctrica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Albornoz E, editor. Seminario Internacional Experiencias en Construcción de Proyectos Hidroeléctricos. VISIÓN SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO: BENEFICIOS PROYECTO MAZAR 2012; Cuenca-Ecuador.
- Aslani A, Naaranoja M, Helo P, Antila E, Hiltunen E. Energy diversification in Finland: achievements and potential of renewable energy development. International Journal of Sustainable Energy. 2013;32(5):504-14.
- Bilal Abdullah N. Design of Micro - Hydro - Electric Power Station International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2013;2(5):39-47.
- Castela P. Centrales Eléctricas. PCASTELA; 2012; Disponible en: [http://www.pcastela.es/documentos/energia/centrales\\_electricas.pdf](http://www.pcastela.es/documentos/energia/centrales_electricas.pdf)
- Chan C. Feasibility study of water vortex power plant (so 2: Turbine design). Malaysia: Multimedia University, 2012.
- Chow VT. Hidráulica de Canales Abiertos Colombia: McGRAW-HILL, Inc.; 1994.
- Fernández P. Turbinas Hidráulicas: Universidad de Cantabria 2010.
- Foro de la Industria Nuclear Española. Energía Hidráulica. España2013; Available from: <http://www.foronuclear.org/es/tags/energ%C3%ADa-hidr%C3%A1ulica>
- Jarabo Friedrich F, Fernández González J. La energía de la biomasa. Técnicas SAdP, editor1999.
- Krochin S. Diseño Hidráulico. Loja, Ecuador Editorial de la Universidad Técnica Particular de Loja; 2011.
- Manjón F, Villalba J, Arribas E, Najera A, Beléndez A, Monsoriu J. Vórtices no estacionarios en un vaso de agua. Revista Brasileira de Ensino de Física. 2013;35.
- Mataix C. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. México: Alfaomega Grupo Editor S.A.; 2008.
- Merino G, Movillo J. Tamaño y Tipos de Centrales hidroeléctricas Chile: Universidad de Concepción 2011.
- Merino L. Energías Renovables para todos. España: Haya Comunicación. 2010.

- Mulligan S, Hull P. Design and Optimisation of a Water Vortex Hydropower Plant. USA: Institute of Technology Sligo, Construction DoCEa; 2010.
- Renedo C. Turbinas Hidráulicas. 2010.
- Secretaría de Energía. Centrales Eléctricas. Ministerio de Planificación Federal Inversión Pública y Servicios de la República Argentina 2013; Disponible en: [http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidos\\_didacticos/CentralesElectricas.pdf](http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidos_didacticos/CentralesElectricas.pdf)
- Smail K, Andrew B. BEST PRACTICES FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF MICRO HYDRO POWER IN DEVELOPING COUNTRIES. United Kingdom Department for International Development, 2000.
- Torres Casierra GA. Algunas características hidrodinámicas de un vórtice en un cilindro inducido por una corriente de agua 2012.
- Zotlöterer. F. Z O T L Ö T E R E R. 2014; Disponible en: <http://www.zotloeterer.com/>

## ANEXOS

### Anexo 1.

#### DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE TURBINAS FABRICADAS

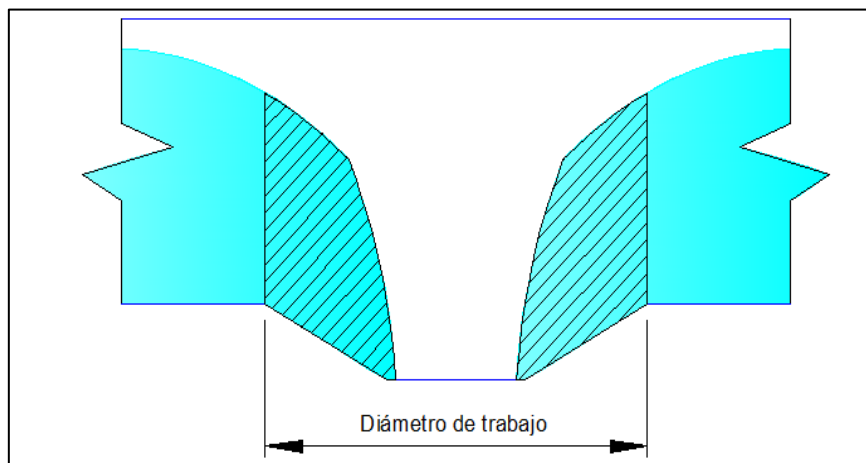
##### Turbina número uno

La turbina número uno fue la turbina que presentó mejor desempeño cualitativa y cuantitativamente. A continuación se presentan sus características.

Diámetro de trabajo: 26 cm

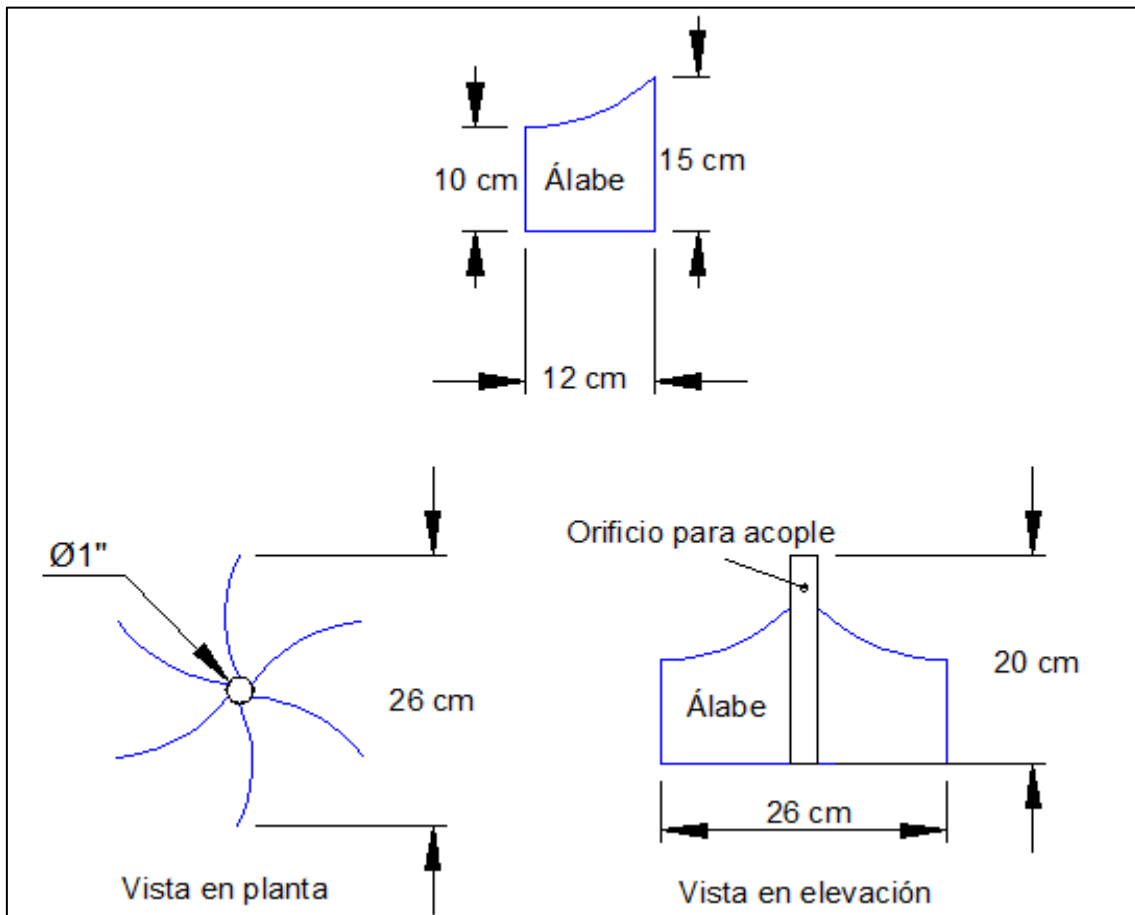
La relación diámetro de trabajo de la turbina/diámetro del tanque de circulación es igual 0.24.

##### Diámetro de trabajo turbina número uno



La turbina número uno posee 6 álabes cóncavos, separados  $60^\circ$  uno de otro. Sus características geométricas fueron asumidas con la hipótesis de que la zona cercana al orificio de descarga del vórtice hidráulico otorgaría mayor fuerza de giro; por esta razón la altura de la turbina tiene una magnitud de 15 cm; además, el incremento en la altura del álabe fue asumido a través de un análisis cualitativo de las condiciones del vórtice, en donde se determinó que la zona central del mismo se encuentra limitada por perfiles con una curvatura vertical convexa, tal y como se puede apreciar en la figura anterior (en la que se especifica el diámetro de trabajo). Así el planteamiento fue que la altura del alabe tuviera menor magnitud en la zona de trabajo, y fuera mayor en la zona de contacto con el eje central para que de este modo, la zona de transmisión de fuerza sea mayor: En la figura siguiente se especifican las características geométricas de la turbina número uno.

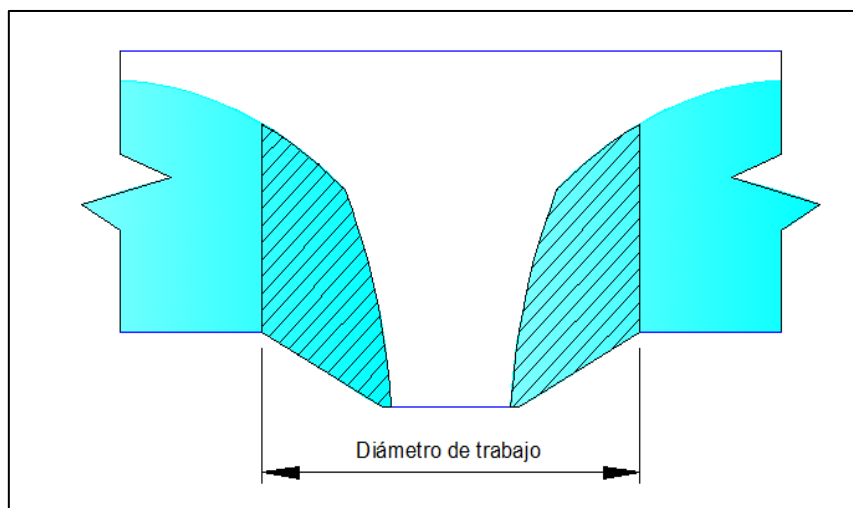
### Características geométricas turbina número uno



### Turbina número dos

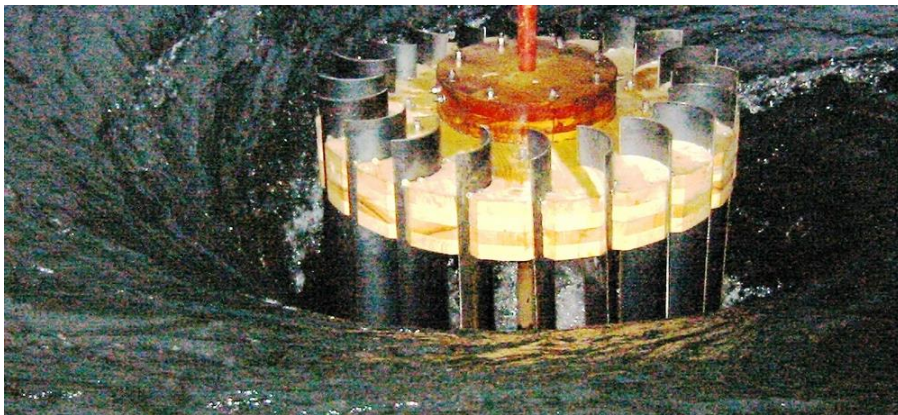
Diámetro de trabajo: 26 cm

### Diámetro de trabajo turbina número dos



La turbina número dos posee 20 álabes cóncavos, separados  $18^\circ$  uno de otro, unidos al eje central a través de dos discos, ubicados en la parte superior e inferior del grupo de álabes. Las características de la turbina número dos se desarrollaron ante la interrogante de cómo afectaría la longitud horizontal del álabe al desempeño de la turbina, ya que, al ser el centro del vórtice libre de agua, gran parte de la sección de cada álabe de la turbina número uno, no sería aprovechado. Además su configuración se referenció en un prototipo de turbina utilizada en una de las plantas de vórtice gravitacional existentes, la cual se muestra en la figura a continuación.

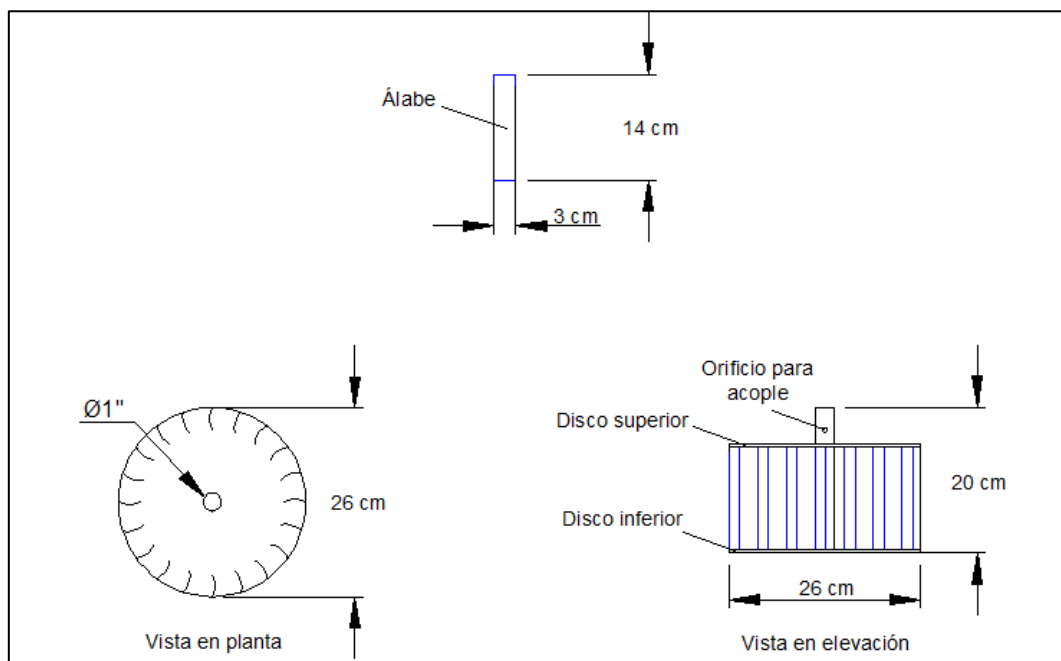
### Turbina de planta de vórtice gravitacional



Fuente: <http://goo.gl/IIH3U6>

En la figura siguiente se especifican las características geométricas de la turbina número dos.

### Características geométricas turbina número dos

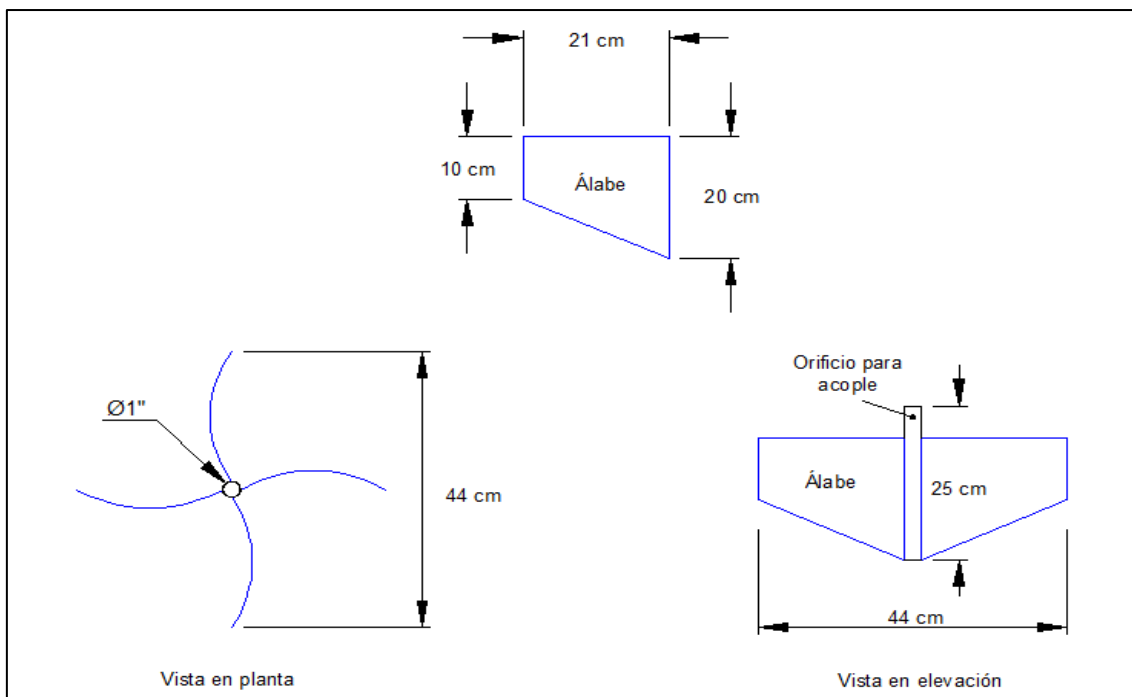


### Turbina número tres

La turbina número tres posee 4 álabes cóncavos, separados 90° uno de otro. La configuración geométrica de la turbina número tres se adoptó en función de la hipótesis de que un mayor diámetro de trabajo y una mayor área de impacto (entendida como el área de choque entre el agua y el álabe) incrementarían la potencia del sistema de vórtice gravitacional; por esta razón el perfil del alabe posee una forma geométrica que se adapta al cono de descarga número dos, para de esta manera incrementar el área de impacto al permitir su ubicación en la posición vertical más cercana posible al orificio de descarga.

En la figura siguiente se especifican las características geométricas de la turbina número tres.

#### Características geométricas turbina número tres

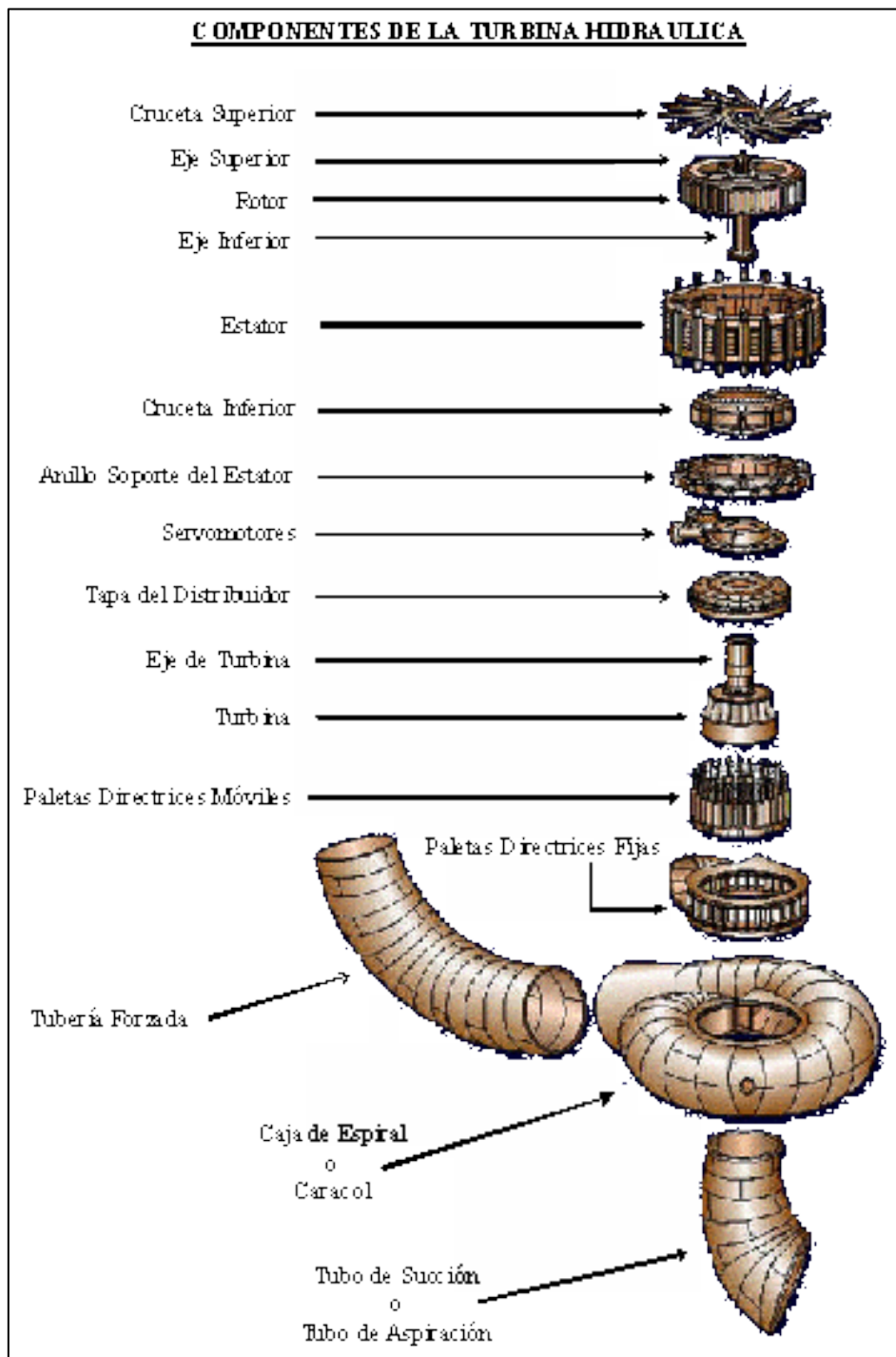


## Anexo 2.

### ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA TURBINA HIDRÁULICA

Los elementos constitutivos de una turbina hidráulica varían dependiendo del tipo de turbina en observación, por esta razón a continuación se expone una serie de imágenes de diferentes turbinas en la que se especifica a detalle sus componentes.

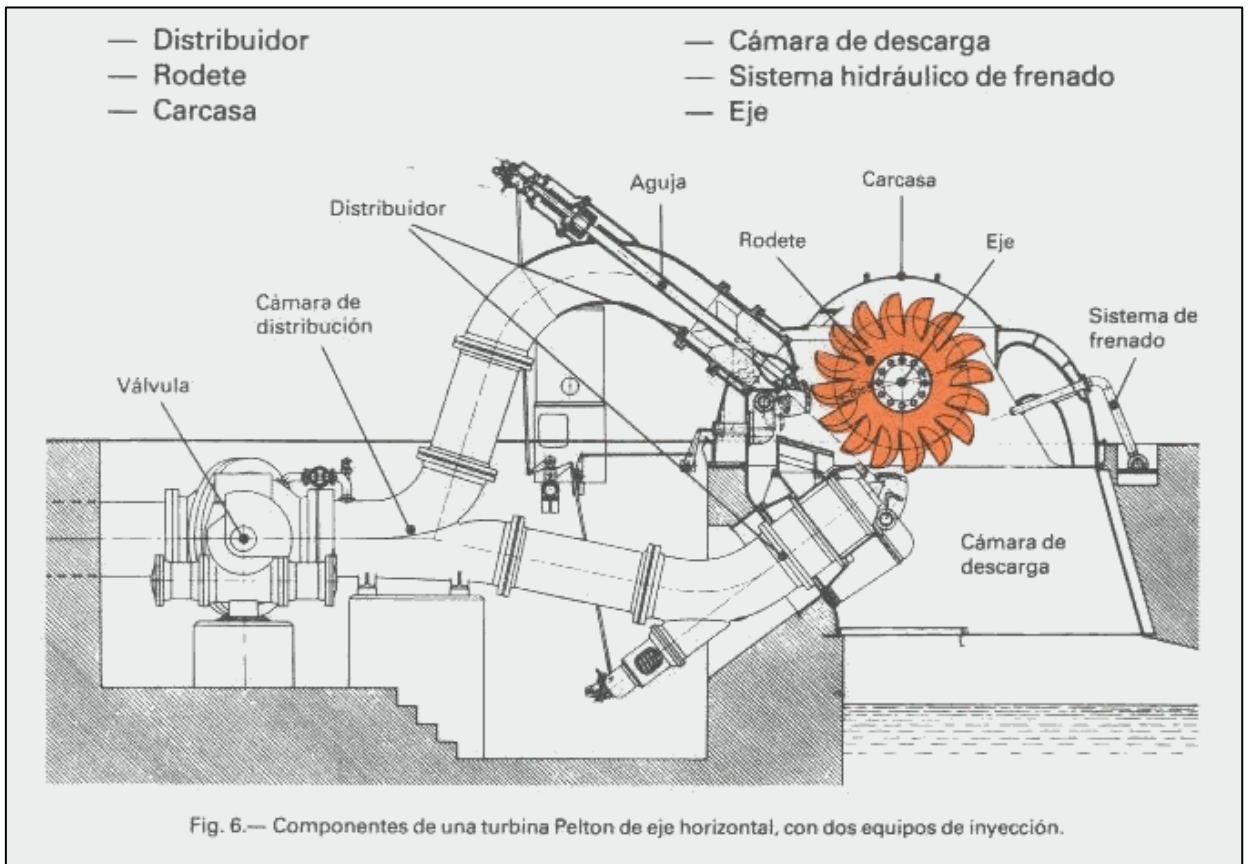
#### Componentes de una turbina Francis



Fuente: <http://goo.gl/3UPZGA>

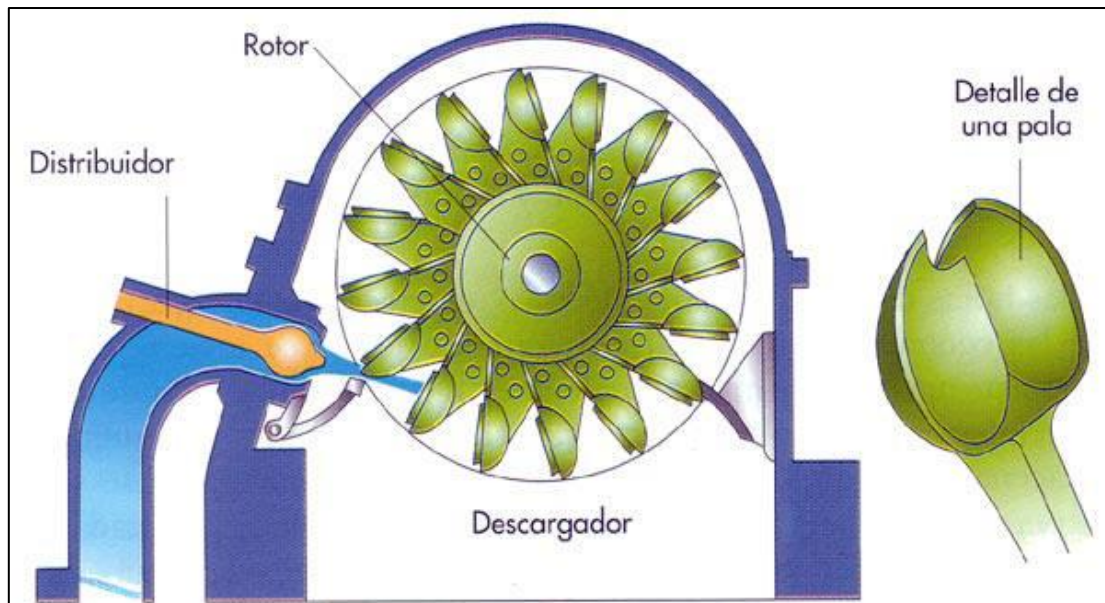


## Componentes de una turbina Pelton



Fuente: <http://goo.gl/luEYg>

## Componentes de una turbina Pelton



Fuente: <http://goo.gl/TBzrP7>

## Componentes de una turbina Francis

1. Rodete
2. Anillo en laberinto (giratorio)
3. Junta anular de carbono
4. Contra-anillo en laberinto (fijo)
5. Tubo de Pitot
6. Cuba de aceite
7. Soporte de palier
8. Palier de guía
9. Orificio compensador, o de descarga
10. Eje de turbina
11. Pernos de acoplamiento
12. Tubo de protección
13. Eje intermedio
14. Podio de servicio
15. Palancas de álabes guía
16. Bielas
17. Aro de compuerta del distribuidor
18. Anillo guía del aro de compuerta
19. Tapa del distribuidor
20. Palier superior de álabes guía
21. Caja espiral
22. Blindaje del distribuidor
23. Alabes guía
24. Palier inferior del distribuidor
25. Fondo inferior del distribuidor
26. Tubo de aspiración

