



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

CONSTRUCCIÓN Y ENSAYO DE UNA RUEDA HIDRÁULICA DE CORRIENTE LIBRE DE 2 M DE DIÁMETRO

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

Luis Felipe Heredia Sánchez

ASESOR: Miguel Hadzich Marín

Lima, noviembre del 2009

RESUMEN

Las Ruedas Hidráulicas representan una alternativa sencilla, confiable y ambientalmente amigable para la generación de potencia, mecánica o eléctrica. Utilizan como fuente energética un flujo de corriente de agua, no producen desperdicios significativos en la transferencia energética, ni requieren mayores trabajos de obras civiles que alteren el área donde se instalan. Además, dada su facilidad constructiva, no requieren conocimientos técnicos avanzados en su diseño, fabricación y manejo.

El objetivo de este trabajo es establecer relaciones cuantitativas sencillas que permitan ponderar el comportamiento de una rueda hidráulica basándose en características básicas del mecanismo y la fuente del recurso energético. Se desea también obtener información cualitativa del funcionamiento de la rueda para una estructura en particular.

Para ello se planteó el diseño, construcción y ensayo de un modelo de prueba; destinado a trabajar en el laboratorio de hidráulica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, el cual cuenta con una geometría constante y permite la regulación de caudal. Mediante el registro y manejo de las variables definidas en este trabajo se plantea la idoneidad de la relación propuesta para evaluar el intercambio energético entre la rueda y el flujo de agua.

Las medidas obtenidas en el ensayo permiten relacionar la velocidad de corriente y el área sumergida de la rueda con el torque y potencia suministrada por la misma. Además, se obtuvo valores del llamado coeficiente de ajuste, que relaciona una expresión teórica ideal con el comportamiento real de la rueda, para una geometría y condiciones de trabajo dadas. Se identifica así las condiciones óptimas de operación y el régimen bajo las que éstas se presentan.





ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN	i
APROBACIÓN DE TEMARIO DE TESIS	ii
LISTA DE SÍMBOLOS	vi
INTRODUCCIÓN	1
1. TURBINA HIDRÁULICA	4
1.1 Definición, tipos	4
1.2 Corriente libre	6
1.3 Usos: Generación Potencia mecánica y Eléctrica	6
1.4 Rueda Hidráulica de ensayo	8
2. ANÁLISIS ENERGÉTICO	10
2.1 Variables del sistema	10
2.1.1 Velocidad de corriente y caudal	11
2.1.2 Torque y velocidad angular	14
2.1.3 Consideraciones	15
2.2 Rueda como generador de potencia	16
2.2.1 Transferencia de Energía	17
2.2.2 Coeficiente de Ajuste	19
2.2.3 Valores esperados	21
3. ENSAYOS DE LABORATORIO	25
3.1 Descripción equipos	25
3.1.1 Canal de ensayo	26
3.1.2 Rueda Prototipo	30
3.1.3 Instrumentos de medida	34
3.2 Metodología del ensayo	38
3.3 Toma de Datos	39
3.3.1 Datos cuantitativos	39
3.3.2 Comportamiento cualitativo	43

4.	RESULTADOS	46
4.1	Curvas de Operación	46
4.1.1	Potencia, Torque vs. Caudal de accionamiento	47
4.1.2	Coeficiente de Ajuste	55
4.1.3	Potencia mecánica real en el eje	57
4.1.4	Condiciones óptimas	58
4.2	Aspectos constructivos	59
4.2.1	Materiales	59
4.2.2	Mecanizado y ensamble	60
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	62
	BIBLIOGRAFÍA	63



LISTA DE SÍMBOLOS

a	: ancho álabe (m)
A	: Área transversal proyectada de la rueda (m^2)
Ca	: coeficiente de ajuste (adimensional)
D	: diámetro exterior de rueda (m)
F	: fuerza (N)
g	: gravedad (m/s^2)
M	: Lectura de la balanza (kg)
P	: potencia mecánica de rueda (W)
p	: presión de fluido (N/m^2)
P_{ideal}	: Potencia ideal máxima extraíble (W)
P_{real}	: Potencia mecánica real en la rueda (W)
Q	: Caudal circulante en el canal (lt/s)
r	: radio de rueda (m)
t	: altura álabe (m)
T	: torque (Nm)
v	: velocidad de corriente (m/s)
V_t	: velocidad tangencial de rueda (m/s)
W	: Potencia mecánica (W)
z	: altura (m)
ω	: velocidad angular (rad/s)
ρ	: densidad de fluido (kg/m^3)
λ	: relación vel. tangencial / vel. de corriente (adimensional)
$\Delta 1$: Nivel de agua al ingreso (mm)
$\Delta 2$: Nivel de agua a la salida (mm)

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se dispone de una variada gama de posibilidades para la generación de potencia mecánica a partir de recursos naturales. Aquellos mecanismos que aprovechan la energía potencial del agua se denominan turbinas hidráulicas y son tres los diseños de uso extensivo: Turbinas Pelton, Kaplan y Francis, cada una más adecuada para determinada combinación de salto y caudal. Es también bastante extendido el uso de la turbina Michell Banki que, pese a tener una eficiencia algo menor de las anteriores, es favorable en razón a su facilidad constructiva y su amplio rango de operación, lo cual implica una gran versatilidad en diseños de baja envergadura.

Todos los mecanismos anteriores suponen la existencia de un desnivel entre la toma y el desfogue de agua de la turbina, el cual es denominado salto hidráulico y sirve tanto para caracterizar la disposición del recurso (en locación) como para evaluar cuantitativamente la capacidad energética del mismo. Así, un valor dado de salto y caudal determina, a groso modo, la selección de una turbina en particular. Si bien puede realizarse obras civiles para encauzar y direccionar el flujo de agua, el valor del salto es difícilmente alterable y depende básicamente de la disposición física que se tiene en el lugar de instalación.

Considerando que no todo encauzamiento de agua posee un nivel apreciable de pendiente, es necesario evaluar el uso de ruedas hidráulicas para extraer potencia en caudales de agua donde, tanto el ingreso como la salida de agua de la turbina se realizan a la “misma” altura. Dichas turbinas se denominan ruedas hidráulicas de corriente libre.

Las turbinas de corriente libre no pueden aprovechar la energía potencial derivada de la diferencia de altura, de manera que su potencial energético total es menor que

el de otros diseños. Sin embargo, tiene la ventaja cualitativa de operar en zonas sin desnivel que poseen canalizaciones de agua, sean naturales o artificiales.

El siguiente trabajo tiene como principal objetivo obtener una expresión confiable que relacione las principales variables involucradas en el intercambio energético. Para ello se hace uso de la experimentación, valiéndose de una rueda hidráulica de 2 m de diámetro construida expresamente para operar en el canal del Laboratorio de Hidráulica, perteneciente a la sección de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú. La variable a tabular es la potencia mecánica al freno, valiéndose de medidas directas de torque y velocidad angular en el eje de la rueda.

La ventaja en el uso del canal descrito radica en la facilidad para controlar el caudal circulante, además de la regularidad de la sección y la buena disposición física del mismo, con vidrios transparentes laterales, que permiten observar la corriente conforme atraviesa la rueda. Esto último favorece la evaluación cualitativa del mecanismo, tomando en cuenta la estabilidad del giro y de la estructura.

Dado el nivel de caudal que maneja el canal, el rango de operación de los instrumentos empleados y la disponibilidad de tiempo para la realización de ensayos, los datos extraídos representan una parte de la información total requerida para respaldar una formulación detallada de la turbina. Sin embargo, es información útil para observar la tendencia en el comportamiento bajo diferentes caudales de accionamiento. Representan también una comprobación sencilla y rápida de la validez de la relación propuesta para la ponderación de la potencia efectiva en una rueda hidráulica.

La estructura básica de la rueda ensayada está basada en un prototipo observado en el área perteneciente a la Casa Ecológica. Puesto que el objetivo principal radica en la evaluación energética, las especificaciones de diseño y dimensionamiento no se han trabajado en detalle. Esto obedece también a limitaciones constructivas, que son acordes con las tecnologías de aplicación al sector rural, dentro del marco de las fuentes de energías renovables.

Se presenta aquí la descripción del ensayo planteado, los equipos utilizados, los datos obtenidos y el análisis de los mismos. Finalmente, se exponen las conclusiones que derivan del trabajo en su conjunto.

El capítulo 1 define el concepto de turbina hidráulica y corriente libre. Se describen los usos del mecanismo y se especifica el tipo y la disposición de la rueda hidráulica de ensayo.

El capítulo 2 describe las variables y ecuaciones planteadas para el análisis energético. Se detallan las consideraciones para su selección y se presenta el coeficiente de ajuste C_a , que es la variable principal de estudio.

El capítulo 3 detalla los equipos utilizados en el ensayo, las secuencia del mismo y los datos obtenidos de la rueda hidráulica en funcionamiento.

El capítulo 4 retoma el análisis energético utilizando las relaciones planteadas en el capítulo 2 y los datos obtenidos durante el ensayo. Se determina así la validez de estas expresiones y se obtiene valores del coeficiente de ajuste, que permite ponderar la potencia extraíble de una rueda hidráulica instalada en una corriente libre.

CAPÍTULO 1

TURBINA HIDRÁULICA

En el presente capítulo se define el concepto de turbina hidráulica, los tipos existentes y las condiciones de operación específicas que determinan el tipo de turbina estudiada. Se denota además los usos principales de este mecanismo y se describe brevemente el equipo utilizado para evaluar su comportamiento.

1.1 Definición, tipos

El término “Rueda Hidráulica” describe de manera sencilla una serie de mecanismos orientados a la extracción de potencia mecánica, utilizando como fuente un caudal y/o represamiento de agua. Formalmente, se conocen como Turbinas Hidráulicas y bajo su definición se engloban numerosos diseños, no necesariamente asociados a la idea general de Rueda.

“... en todos los tipos de turbinas, la fuerza (tangencial) impulsora sobre las paletas es la reacción dinámica de la rapidez o de la variación de la cantidad de movimiento...” [Faires, 1962]

Una definición formal de turbina considera la variación de la cantidad de movimiento producido en el fluido que acciona la turbina, sea compresible o incompresible. Esta definición sugiere también la manera en que se aborda el análisis de la transferencia de energía efectuada en el mecanismo, el cual debe considerar las características del fluido antes y después de actuar sobre la turbina.

En el caso de las turbinas hidráulicas, el flujo de accionamiento corresponde a un caudal de agua, el cual contiene en mayor medida energía cinética, la cual es aprovechada por la turbina para generar potencia en el eje.

Existen múltiples tipos de turbinas hidráulicas y su selección se basa de manera general en características técnicas del recurso (salto, caudal). Uno de estos subgrupos corresponde a las ruedas hidráulicas de corriente libre.

“... La turbina de corriente libre es un dispositivo mecánico que extrae la energía cinética de una corriente fluida libre, como un río o un canal, y, a través de fuerzas de sustentación y arrastre, la convierte en energía mecánica...” [Servan, 1990]

Una característica resaltante de las ruedas hidráulicas (figura 1.1) es que suelen trabajar con saltos hidráulicos muy reducidos, o incluso nulos. Este último es el caso de la rueda hidráulica de admisión inferior, sumersión parcial y eje horizontal, cuya disposición se ilustra en la figura 1.1 e.

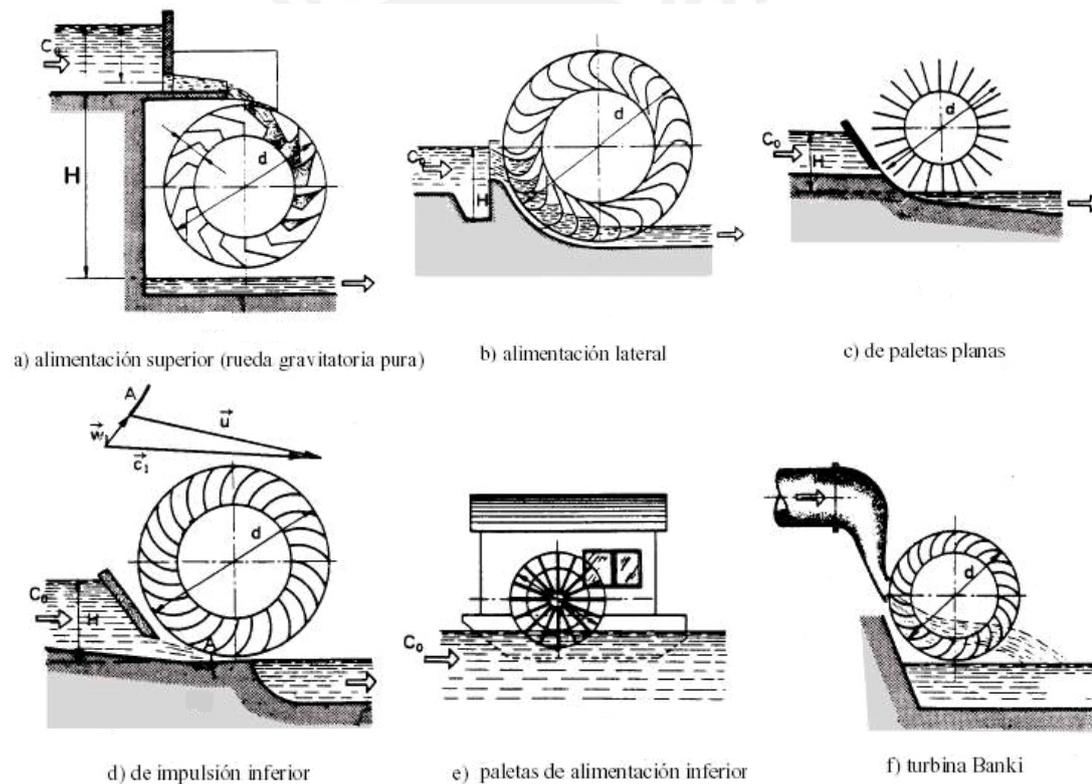


Figura 1.1: Ruedas Hidráulicas de Corriente libre¹

Esta rueda opera en la superficie de un corriente libre, en la cual no se presenta desnivel alguno entre la admisión y la salida de agua. Bajo tales circunstancias, la evaluación del intercambio energético ocurrido en la rueda toma en cuenta el factor más característico que representa al flujo: la velocidad de corriente.

¹Roberto Córdova, Breve historia de las turbinas hidráulicas - UCA
<http://www.uca.edu.sv/deptos/ccnn/dlc/pdf/turbinas.pdf>

1.2 Corriente libre

Para efectos de simplificación se define como corriente libre a un flujo horizontal de agua, sin desniveles en el tramo evaluado, cuyo desplazamiento obedece únicamente al impulso conferido por la velocidad de corriente presente en él. En relación a la rueda que opera en ella, está accionada por un flujo que hace contacto por la parte inferior, produciéndose tanto el ingreso como la salida a la misma presión (atmosférica). En estas condiciones, la velocidad de corriente es el factor característico que describirá al fluido. Esta velocidad, asociada a una sección de contacto con la rueda, define un caudal de accionamiento, el cual será referente también en la determinación del potencial energético del flujo de agua descrito.

1.3 Usos: Generación Potencia Mecánica y Eléctrica.

Las turbinas hidráulicas producen potencia mecánica en el eje, la cual puede ser utilizada tanto de manera directa (cargas mecánicas) como indirecta (generación de potencia eléctrica).

Las cargas mecánicas más representativas son las bombas para elevación y/o transporte de agua y los molinos. Esto se utiliza principalmente en zonas rurales en las cuales otras formas de energía, específicamente eléctrica y combustibles, son de disponibilidad escasa o nula. Un determinado tipo de carga puede requerir el uso de una transmisión, acorde al nivel de carga requerido (fuerza, torque) y al régimen de trabajo (velocidad lineal, velocidad angular).

El uso indirecto está referido a la generación de potencia eléctrica, que a su vez puede utilizarse tanto para cargas eléctricas, como iluminación y electrodomésticos, como para el accionamiento de maquinaria. La energía eléctrica supone ciertas ventajas relacionadas con el manejo de la misma (almacenamiento y distribución), pero implica el uso de algún tipo de generador con la consiguiente pérdida intermedia de energía neta, adicional a la causada por la distribución.

El diseño de transmisiones para el acople de generadores eléctricos con turbinas hidráulicas toma en cuenta el torque resistente así como el régimen de giro. Para la

mayoría de los casos, es necesario alcanzar un nivel elevado de revoluciones para que el generador opere con un valor razonable de eficiencia.

En el caso de las ruedas hidráulicas de corriente libre, la velocidad de giro del eje es bastante reducida, en comparación a la que requiere un generador eléctrico estándar. Esto se debe en mayor parte a que la corriente de accionamiento que incide sobre las paletas difícilmente supera los 2 m/s en su disposición natural, tanto para canales de irrigación como para ríos. Por otra parte, se presenta una relación inversamente proporcional entre el diámetro exterior de la rueda con la velocidad de giro. En la presencia de ambos factores, la velocidad angular del eje será muy inferior a la requerida por el generador para operar de manera estable.

Se evidencia entonces la necesidad de multiplicadores de velocidad, que son mecanismos de construcción y funcionamiento análogo a los ampliamente extendidos reductores. En este caso, se busca el efecto contrario: una multiplicación de la velocidad de giro a costa de la reducción del torque efectivo, considerando las pérdidas por transmisión inherentes al mecanismo.

Los reductores de engranajes rectos y helicoidales pueden operar satisfactoriamente como multiplicadores de velocidad. Bastaría invertir la disposición de los ejes, de manera que la entrada de potencia se aplique en el eje de mayor diámetro. No se recomienda el uso de transmisiones de tornillo y sinfín pues estas tienden a trabarse cuando operan en forma inversa. Cabe destacar que para ruedas hidráulicas de corriente libre cuyo diámetro exterior es superior a 1 m la relación de transmisión mínima necesaria estaría en el orden de 1:10. Esto puede incrementarse considerablemente en función al tipo de generador, por lo que serían necesarios mecanismos de múltiples etapas para mantener unidades de transmisión compactas (pequeñas).

Una transmisión correctamente acoplada debe tomar en cuenta tanto el régimen de giro óptimo como el torque resistente ejercido por la carga, que en este caso es un generador eléctrico. Es importante conocer no sólo las curvas de operación del generador sino también las de la turbina que lo acciona, que en nuestro caso corresponde a una rueda hidráulica de corriente libre. Una adecuada relación de transmisión aprovechará el punto óptimo de generación de potencia mecánica en la

rueda, equiparándolo con las condiciones nominales de operación del generador eléctrico.

1.4 Rueda Hidráulica de ensayo

La rueda hidráulica a ensayar opera en lo que anteriormente se describió como corriente libre, siendo tanto la admisión como la salida del agua por la parte inferior de la misma. Es de inmersión parcial y eje horizontal (no sumergido). Los álabes, o paletas de contacto, son rectos y tienen una inclinación respecto a la dirección del agua.

Para el diseño de la rueda de ensayo se adoptó la estructura de un modelo perteneciente a la Casa Ecológica (figura 1.2). Consiste en una armadura formada por cuatro anillos, unidos por radios y barras longitudinales al eje, utilizando secciones angulares de acero. En este modelo, la rueda se conecta con el eje mediante pernos pasantes. Para la rueda de ensayo se optó por utilizar prisioneros; manteniendo la independencia del armazón respecto al eje.



Figura 1.2: Rueda Hidráulica Modelo (Casa Ecológica)

Para el registro de potencia se adoptó el sistema utilizado en la turbina Pelton del Laboratorio de Energía de la sección de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú. En esencia un freno Prony que aplica carga

controlada a un eje, frenándolo y disminuyendo su velocidad progresivamente. En combinación con un tacómetro adecuado permite obtener medidas de torque y velocidad angular, que a su vez permiten elaborar las curvas de carga de la turbina ensayada.

Al conjunto se agregó una base soporte adecuada a las dimensiones del canal y de la rueda. Finalmente, se tuvo un diseño compacto y sencillo de construir (figura 1.3).



Figura 1.3: Rueda Hidráulica de ensayo

La rueda hidráulica de ensayo opera en un canal artificial de sección conocida y caudal regulable. Mediante el freno que actúa en el eje se aplica carga progresivamente creciente, la cual produce disminución, también progresiva, en la velocidad angular de la rueda. Esta es registrada por un tacómetro de contacto directo en el eje. Con ello se obtiene medidas de potencia efectiva en el eje, en relación a distintos caudales de accionamiento que inciden en la rueda.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS ENERGÉTICO

En este capítulo se define las variables de control y las variables de registro en el ensayo. Luego se presenta a la rueda hidráulica como mecanismo generador de potencia, describiendo los términos y formulaciones referidas al intercambio de energía entre la corriente y la rueda.

2.1 Variables del Sistema

Para realizar el análisis energético de la rueda hidráulica es necesario identificar de manera clara las variables de control, que son susceptibles de variación; así como las variables de registro, que son incógnitas y objetivo del ensayo. Es apropiado especificar los rangos de trabajo elegidos para estas variables y la importancia relativa de cada factor respecto al comportamiento de la rueda.

Para este caso, se ha identificado dos variables características en cada grupo:

- a) Respecto a las variables de control, se trabaja con la velocidad de corriente y el caudal; pues ambas caracterizan el flujo de agua que acciona la rueda y presentan de manera directa una referencia del potencial energético contenido en el flujo.
- b) Respecto a las variables de registro, se trabaja el torque y la velocidad angular de rueda; pues ambos definen la potencia efectiva de la rueda que puede proveer el mecanismo.

Estos cuatro parámetros: velocidad de corriente, caudal, torque y velocidad angular resumen de manera clara los principales factores que describen el intercambio de energía entre el flujo de agua y la rueda.

2.1.1 Velocidad de Corriente y Caudal

La velocidad de corriente es la característica más resaltante cuando se evalúa el potencial energético de la corriente libre. La ecuación 2.1 resume los factores ponderables en el intercambio energético (figura 2.1) de un flujo de agua. En ausencia de salto hidráulico significativo (o potencial gravimétrico) y diferencial de presiones, es el cambio de energía cinética experimentado por el agua el que confiere energía a la rueda.

$$\int \frac{dp}{\rho} + \int gz + \int \frac{dV^2}{2} \pm W = 0 + 0 + \int \frac{dV^2}{2} \pm W = 0 \quad (2.1)$$

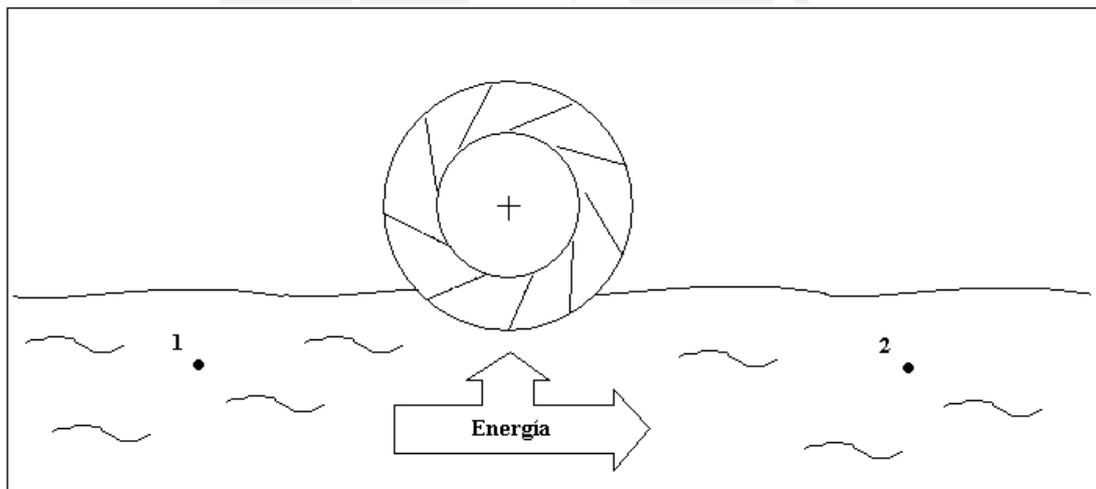


Figura 2.1: Transferencia de energía – Rueda Hidráulica

La velocidad, entendida como el desplazamiento de una unidad diferencial de agua en un periodo de tiempo, no es un valor uniforme; pues incluso en canales de irrigación con sección y pendiente constantes existe diferencia entre las medidas en función al punto donde éstas son tomadas. Aún cuando la corriente presente un comportamiento constante en el tiempo (Flujo Permanente) es posible identificar un gradiente de velocidades en una sección dada del canal. Esto puede ser aun más notorio en relación al nivel de rugosidad del mismo.

Sin embargo, tanto para canales artificiales como naturales es correcto adoptar una medida promedio de la velocidad de corriente para efectos de caracterización; considerando siempre las salvedades con las que fue obtenido y el nivel de error que supone. Puesto que este valor es requerido para determinar el potencial energético aprovechable en una rueda hidráulica, debe tomarse en cuenta aquel valor que represente de manera acertada la corriente que incidirá sobre la rueda.

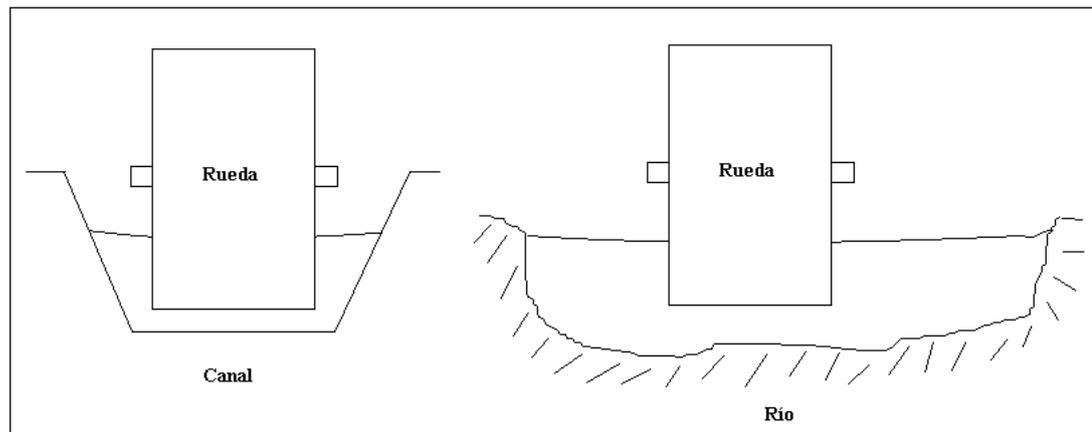


Figura 2.2: Ruedas hidráulicas operando en corrientes distintas

Se suele considerar velocidades de corriente hasta un máximo 2 m/s. Esto es válido tanto para canales artificiales como naturales. En canales artificiales obedece a razones de diseño, que establecen límites² superior e inferior en función al tipo de flujo circulante y al material que compone el canal. En el caso de los canales naturales, obedece a observaciones y medidas realizadas en diversas situaciones bajo distintas condiciones de caudal y sección. Puesto que en este trabajo se evalúa el comportamiento de una rueda hidráulica situada en una corriente libre, donde no se han realizado mayores trabajos de encauzamiento, se tomará este rango como acertado.

La velocidad de corriente es una propiedad intensiva. Sin embargo, el potencial energético derivado de su variación depende de la cantidad de masa circulante. Para determinar el valor real de potencia que se extrae de una corriente debe considerarse también el flujo másico; el cual, para condiciones atmosféricas estables, puede expresarse de manera equivalente como flujo volumétrico o caudal. Tomando en consideración ambos factores (velocidad y caudal) puede formularse

² Krochin Sviatoslav. "Diseño Hidráulico", Ed. MIR, Moscú, 1978

modelos que cuantifiquen el potencial energético, toda vez que se considera para el fluido una propiedad intensiva y otra extensiva.

En corriente libre, el caudal puede ponderarse en función a la velocidad promedio de corriente y a la sección por la que el flujo transcurre, la cual está dada por la geometría del canal. Para canales artificiales, esta sección suele ser aproximadamente constante, por lo que el valor del caudal ponderado será bastante acertado. Para canales artificiales, como los ríos, la determinación de la sección puede ser menos simple, considerando además que la velocidad de corriente puede variar significativamente de un punto a otro.

Para cualquiera de los casos se asume como sección efectiva sólo aquella definida por los álabes de la rueda que hacen contacto con el agua; esto es, la sección proyectada transversal a la dirección de la corriente. La acertividad de esta suposición dependerá siempre de la distribución real de velocidades en el canal.

Para el ensayo planteado en este trabajo el control de la velocidad y el caudal se hace de manera conjunta, ya que el mecanismo de regulación es una válvula que controla el caudal que ingresa a un canal artificial (figura 2.3). Este canal tiene sección constante, lo cual permite determinar indirectamente la velocidad promedio del flujo circulante. Ya que el canal es considerablemente liso y el flujo es laminar, la velocidad ponderada será bastante aproximada al valor real.



Figura 2.3: Canal de Hidráulica - PUCP

2.1.2 Torque y Velocidad Angular

El torque y la velocidad angular son dos variables de registro que, de manera individual o en conjunto, proveen la información necesaria para caracterizar a la rueda hidráulica, entendida ésta como mecanismo proveedor de potencia. Ambas variables son las incógnitas del ensayo y sus valores se registran en el eje de la rueda (figura 2.4), variando progresivamente el caudal que incide en la rueda y el nivel de carga sobre la misma.

El torque representa la capacidad de la rueda para accionar una carga. Se expresa en Nm en el Sistema Internacional y es una unidad apropiada para un mecanismo giratorio. Tal giro puede convertirse en un movimiento lineal de manera que la unidad de referencia sea fuerza, expresada en N.

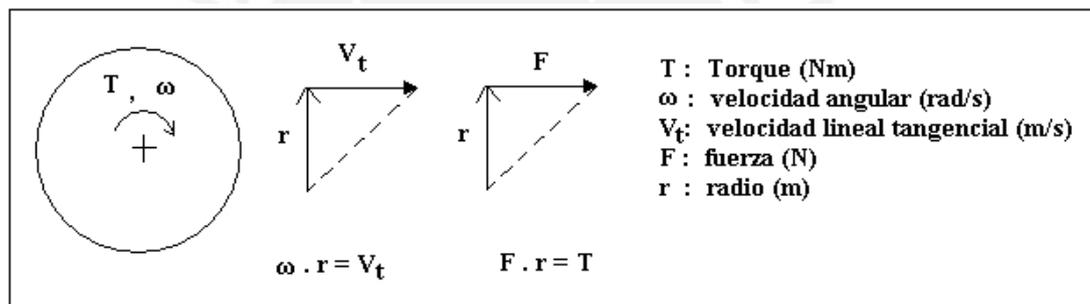


Figura 2.4: Torque y velocidad angular en un eje

Toda carga accionada debe ser compatible con el mecanismo que suministra potencia, tanto a nivel de carga como en régimen de trabajo. En la rueda hidráulica se tiene un eje que gira a determinada velocidad angular y produce un valor de torque, lo que representa en conjunto potencia mecánica. Análogamente, la carga accionada (molino, generador eléctrico, etc.) requiere un torque para producir movimiento en determinada cadencia cíclica. El torque que ejerce la rueda debe ser mayor al requerido por la carga, que en equilibrio dinámico opera a cierta velocidad angular o lineal estipulada por la naturaleza del trabajo. Los generadores eléctricos suelen requerir torques relativamente bajos actuando a altas revoluciones mientras que cargas mecánicas como los molinos de granos requieren torques altos a bajas revoluciones. La transmisión cumple allí una función importante compatibilizando las características de la turbina y las de la carga.

En el ensayo planteado se definen el torque y la velocidad angular como variables de registro, en tanto son el objetivo mismo del ensayo. Estas proveen información real sobre las capacidades de la rueda considerando distintos flujos de accionamiento. Esta información puede contrastarse con aquella proporcionada por modelos desarrollados analítica o empíricamente, para propósitos de validación y posterior uso.

2.1.3 Consideraciones

Las dimensiones de la rueda suelen representar en cualquier planteamiento de turbinas hidráulicas un grupo de variables importante. Las dimensiones adoptadas y las proporciones entre éstas suelen estar reguladas en función al tipo de turbina elegido, a la disposición física del flujo y a las condiciones de operación requeridas. Para cada caso existen recomendaciones asociadas a tipos particulares de rueda destinadas a producir un funcionamiento confiable y eficiente.

Por ello es oportuno resaltar que las dimensiones son en sí variables del sistema, siempre y cuando exista cierto nivel de flexibilidad para manejarlas y optar por valores que impliquen determinados beneficios. Los criterios utilizados para elegirlos son tanto cuantitativos, evaluados en términos como potencia o resistencia; como cualitativos, considerando la disposición física del lugar de operación, así como la disponibilidad de materiales. Cualquiera sea el caso, siempre se evaluará la adopción de ciertas dimensiones, lo cual les confiere la categoría de variables.

Sin embargo, existen casos en que las dimensiones están previamente determinadas, ya sea porque se adapta equipos ya construidos a una nueva locación o porque algunas limitaciones particulares no permiten utilizar más opciones en términos de diseño o construcción. En este caso, las dimensiones dejan de ser variables y se transforman en parámetros, lo cual restringe pero simplifica la evaluación.

En el manejo de este trabajo, que comprende tanto diseño como construcción y ensayo, no se considera las dimensiones como variables en tanto se utiliza una sola rueda; cuya geometría fue definida previamente. Esto no implica que no se

considere para el análisis este factor, como se verá posteriormente. Para la relación que se evalúa, el área sumergida de álabe determina el caudal incidente sobre la rueda y el nivel de potencia efectivo, por lo que el ensayo contempla cierta variabilidad en lo que respecta a dimensiones. Esto se desarrollará con mayor detalle en el capítulo 4 en el ítem referido a condiciones óptimas de operación.

2.2 Rueda como Generador de Potencia

La rueda hidráulica opera como una turbina, que convierte la energía cinética del agua en potencia mecánica en el eje. Esta potencia a su vez es utilizada para accionar alguna carga. Mientras que el caudal de agua es la fuente original de energía, la rueda se torna a la vez en receptora y emisora de potencia, la cual está establecida por el potencial contenido en el agua y el nivel de carga que se impone sobre el mecanismo.

El modelamiento de este intercambio energético no está normalizado para las ruedas hidráulicas de corriente libre, pues en principio éstas no son de uso extendido. La mayoría de diseños corresponden a iniciativas académicas privadas, dentro del marco de las energías renovables y no se maneja información uniforme. Esto también obedece al carácter empírico de muchos de estos proyectos, basados en ensayo y error; por lo que no se dispone siempre de registros adecuados que permitan verificar los modelos analíticos planteados para su operación.

La relación adoptada en este estudio (ecuación 2.3) no es la única fórmula planteada para la rueda hidráulica y posiblemente tampoco sea la más exhaustiva; pero es un referente común en la bibliografía asociada a la rueda hidráulica de sumersión parcial y eje horizontal. Tiene un carácter práctico y referencial, por lo que no es inadecuado plantearla con las debidas consideraciones del caso. Además, ya que el ensayo proporciona medidas reales contrastables con el planteamiento teórico, es un ejemplo sencillo y concreto de modelación y validación que incluye tanto elementos analíticos como información de comportamiento real.

2.2.1 Transferencia de Energía

A nivel analítico, la evaluación del intercambio energético entre el caudal de agua y la rueda puede tornarse complejo. Considerar todos los factores involucrados puede ser engorroso y extenso, por lo que se suelen plantear relaciones sencillas para efectos de ponderación preliminar. Uno de tales planteamientos corresponde al propuesto por CEPIS³, referido a las ruedas hidráulicas de corriente libre:

$$P = 0,41 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.2)$$

Donde:

P : Potencia mecánica en la rueda (W)

ρ : Densidad del fluido (kg/m³)

A : Área sumergida⁴ proyectada de la rueda (m²)

V : Velocidad de corriente (m/s)

* El factor 0,41 es un coeficiente análogo a la eficiencia, en relación a un óptimo teórico.

Esta expresión es muy similar a la relación planteada para potencia ideal, de uso extendido en aerogeneradores:

$$P_{ideal} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.3)$$

Donde:

P_{ideal} : Potencia ideal máxima extraíble (W)

Estas expresiones toman en cuenta el área sumergida (figura 2.5) transversal proyectada del álabe (o paleta) sobre la que incide el agua. Además, consideran la velocidad promedio del flujo.

³ Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias de Ambiente

⁴ Se considera el área proyectada transversal a la dirección del flujo.

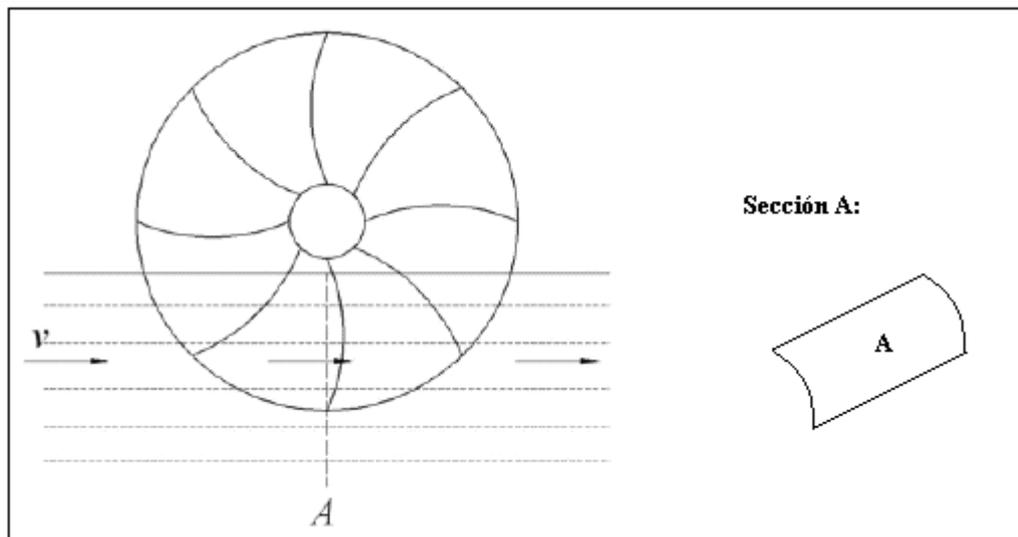


Figura 2.5: Flujo incidente sobre rueda hidráulica

Cabe resaltar que esta ponderación considera la velocidad de corriente antes que ésta sea afectada por la rueda. Para canales amplios, como los ríos, esta observación no tiene mayor propósito, pues el caudal total que circula es muy superior al que incide sobre la rueda. Sin embargo, para canales estrechos (en relación a las proporciones de la rueda) se produce un represamiento en el ingreso; por lo que la velocidad de corriente medida al ingreso es menor que la velocidad de corriente original.

Se observa así que esta expresión considera por un lado características del caudal previo a la instalación de la rueda (velocidad de corriente) y por otro lado el área sumergida que hace contacto efectivo con el caudal, lo que se produce con la rueda instalada. Así, se pondera de manera preliminar la potencia de salida que se tendrá en la rueda en función a las dimensiones de ésta (álabe) y a la velocidad de corriente en la que estará parcialmente sumergida.

Nótese que esta expresión no considera la proporción en el ancho y alto de las paletas, limitándose a evaluar el área total de la misma. Este es, entre otros factores, uno de los puntos que adolece esta relación. Para este factor, y aquellos otros que no se evalúan individualmente pero que influyen significativamente en el comportamiento, se introduce un coeficiente de ajuste.

2.2.2 Coeficiente de Ajuste

El coeficiente de ajuste es un factor adimensional cuyo propósito, para este estudio, es compatibilizar la relación teórica de potencia ideal (ecuación 2.3) con el comportamiento real de la rueda, el cual se obtendrá de mediciones directas en laboratorio.

El coeficiente de ajuste engloba todas las otras características de la rueda cuya influencia no se aborda individualmente, pero cuyo efecto en conjunto define el comportamiento de una rueda hidráulica en particular. Algunos de estos factores son:

- La curvatura del álabe y el ángulo de ataque respecto a la dirección de la corriente.
- Las dimensiones del álabe y el gradiente de velocidades.
- La inercia de la rueda.

Así, el coeficiente de ajuste simplifica la relación final que proyecta la potencia extraíble de una rueda, considerando que se mantienen condiciones de operación similares a las del ensayo.

$$\text{Coeficiente de Ajuste} = \frac{\text{Potencia Real}}{\text{Potencia Ideal}} = Ca \quad (2.4)$$

$$P_{real} = Ca \cdot P_{ideal} = Ca \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3) \quad (2.5)$$

Donde:

P_{real} : Potencia mecánica real en la rueda (W)

Ca : Coeficiente de ajuste (adimensional)

ρ : Densidad del fluido (kg/m^3)

A : Área sumergida proyectada de la rueda (m^2)

V : Velocidad de corriente (m/s)

Puesto que el coeficiente de ajuste será extraído de una configuración específica de rueda, debe tomarse con cautela su validez en disposiciones que operen bajo diferentes condiciones. Lo más importante es la identificación de la tendencia de las curvas de operación (figura 2.6) y la ubicación de los puntos óptimos, así como el rango de valores producidos.

El coeficiente de ajuste C_a tiene valores distintos según el punto de operación de la rueda. Sin embargo, para efectos de estimación suele tomarse el valor óptimo. Éste es el término que se utiliza en las ponderaciones previas y es el valor citado en las referencias.

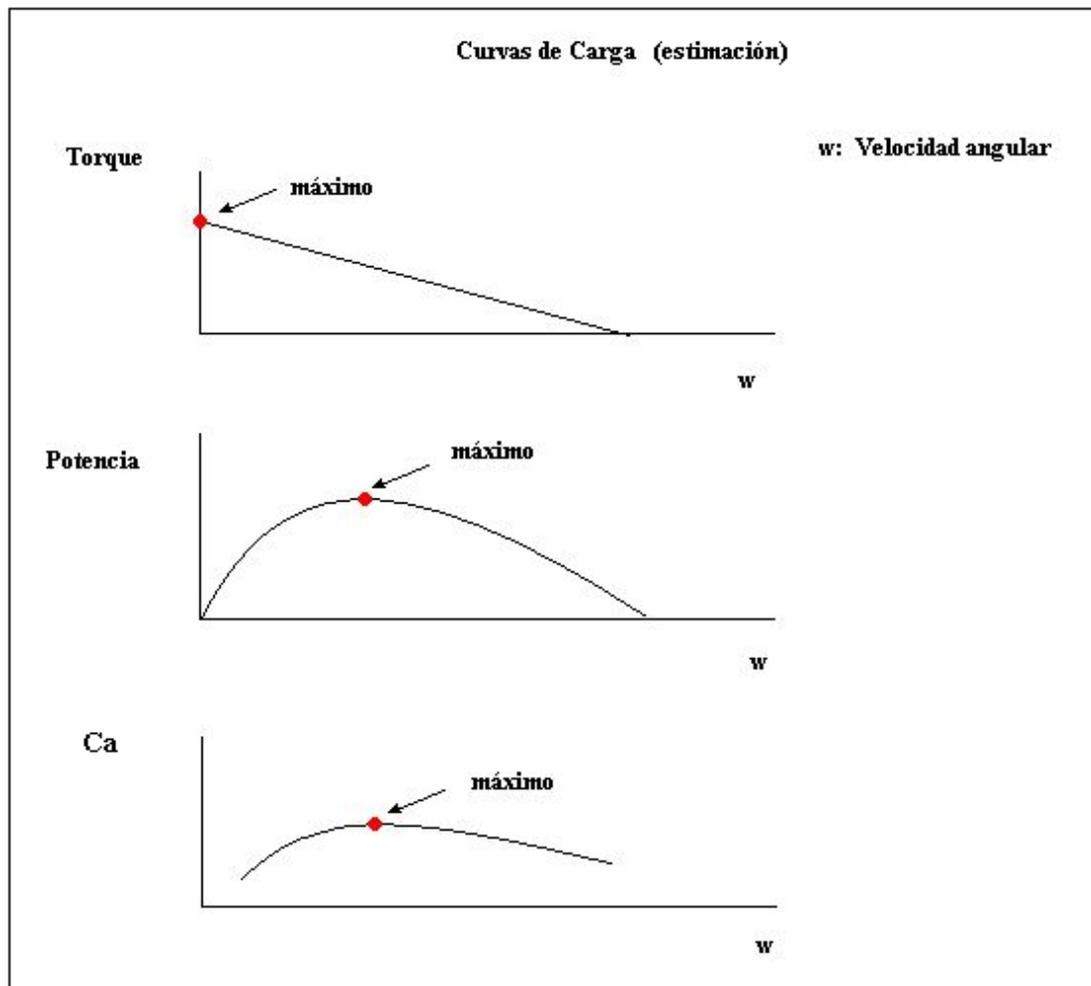


Figura 2.6: Curvas de carga esperadas para la rueda hidráulica

2.2.3 Valores esperados

Como se mencionó anteriormente, el coeficiente de ajuste engloba varios factores que tienen influencia en el comportamiento de la rueda, pero que no se evalúan individualmente. Por ello, dado que la rueda tiene una geometría definida y será instalada en un canal artificial de sección reducida, es importante ponderar la validez de los resultados obtenidos y la posibilidad de extenderlos a otras disposiciones.

La ecuación 2.3 plantea la potencia ideal extraíble de un fluido en relación al área de contacto de la rueda con el mismo. La relación 2.2 de autoría de CEPIS difiere solo en el primer factor:

$$P_{ideal} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \qquad P_{CEPIS} = 0,41 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Una expresión equivalente para la segunda relación es utilizando el concepto de factor de potencia, el cual aplica un factor de reducción sobre el teórico máximo. Rescribiendo la segunda expresión se tendría:

$$P_{CEPIS} = 0,41 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 = 0,82 \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3) = Ca \cdot P_{ideal}$$

Donde el coeficiente de ajuste (Ca) sugerido es igual a 0,82.

Existen otras referencias para el Ca de la rueda hidráulica. Un documento⁵ del área de energías renovables plantea Ca comprendidos entre 0,1 a 0,6 los cuales dependen del tipo de rueda utilizada y de la relación entre la velocidad tangencial de la rueda y la velocidad de corriente original. Se indica valores entre 0,3 y 0,4 para ruedas de paletas planas.

Muchas de estas referencias son incompletas y poco confiables, principalmente porque la información referida a la misma es escasa y muy fragmentada. Este es uno de los motivos principales para la realización de ensayos con datos tabulados que permitan contrastar tales referencias con un modelo de prueba.

⁵ Riobomba: Una alternativa de riego para zonas rurales – Emilio Mayorga

Considerando la sección del canal de ensayo (cuyas características serán detalladas en el capítulo 3) y la velocidad de corriente desarrollada, se puede estimar a primera mano el nivel de potencia extraíble con la rueda. Para las siguientes condiciones se tendría (ecuación 2.5):

$$P_{real} = Ca \cdot P_{ideal} = Ca \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3)$$

P_{real} : Potencia mecánica real en la rueda (W)

Ca : Coeficiente de ajuste: aproximadamente 0,35 para paletas planas

ρ : Densidad del fluido: aprox. 1000 kg/m³ (agua)

A : Área sumergida proyectada de la rueda (m²)

V : Velocidad de corriente (m/s)

El área sumergida de la rueda estaría limitada por el ancho del canal y el caudal circulante en él. La velocidad de corriente libre, previo a la instalación de la rueda, está tabulada (tabla 2.1) también en función al caudal circulante. Se tiene entonces:

Tabla 2.1: Flujo incidente⁶

Caudal circulante (lt/s)	Sección canal cubierta (m ²)	Velocidad de corriente (m/s)
20	0,0360	0,598
40	0,0544	0,795
60	0,0692	0,930
75	0,0792	1,012

Considerando que el álabe actúa en toda la sección del canal (aproximación) se proyecta entonces los siguientes valores de potencia (tabla 2.2):

⁶ Valores obtenidos utilizando la bomba y canal del Laboratorio de Hidráulica (PUCP), trabajando con la compuerta de salida abierta al máximo. Para el máximo caudal admisible (75 lt/s) se presenta la corriente con mayor velocidad (aprox. 1 m/s)

Tabla 2.2: Potencia mecánica en la rueda de ensayo (proyección), utilizando $C_a = 0,35$

Caudal (lt/s)	Potencia mecánica eje (W)
20	1,3
40	4,8
60	9,7
75	14,4

Esta estimación denota las potencias máximas de salida para cada nivel de caudal incidente sobre la rueda, suponiendo que todo actúa sobre el álabe. Para esta aproximación se considera que los álabes se sumergen en toda la sección del canal y el nivel de éste no varía significativamente. Las curvas de potencia real obtenidas en el ensayo se elaborarán en el Capítulo 4.

La velocidad de corriente en canales, tanto naturales como artificiales, alcanza usualmente máximos de 2 m/s. Considerando ruedas con mayores secciones de álabe y el espacio y estructura disponible para instalarlos se puede ponderar mayores niveles de potencia, en base a la expresión 2.5 y un valor promedio de C_a igual a 0,35. El siguiente gráfico (figura 2.7) muestra estos valores en función al área de paleta y a la velocidad de corriente. Nótese que un mismo nivel de potencia puede alcanzarse con diferentes combinaciones de sección y velocidad. En general, mayores velocidades de corriente inciden de manera más marcada en la potencia mecánica útil extraíble de la rueda.

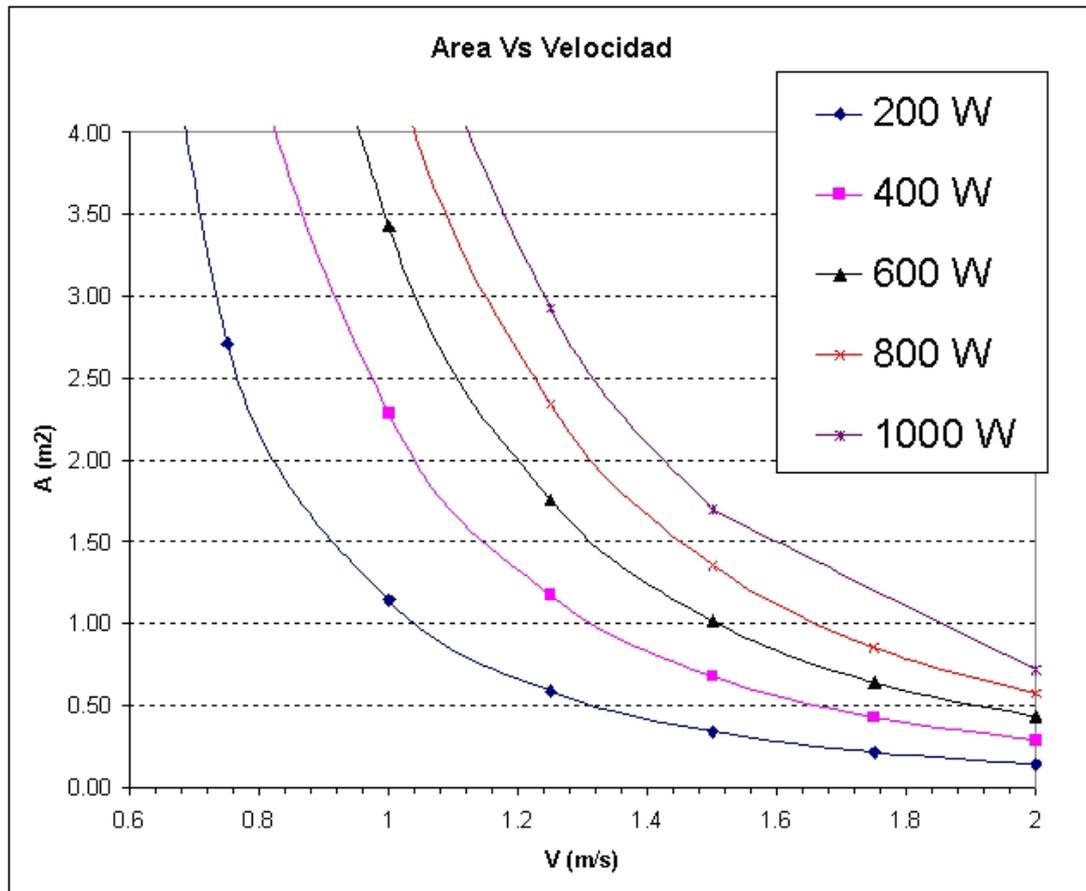
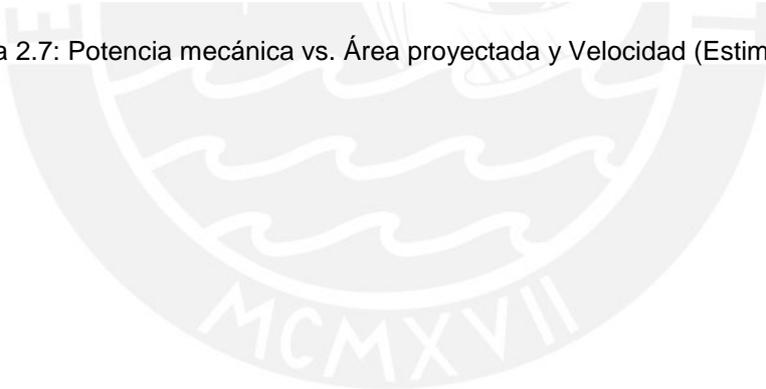


Figura 2.7: Potencia mecánica vs. Área proyectada y Velocidad (Estimado), $C_a = 0,35$



CAPÍTULO 3

ENSAYOS DE LABORATORIO

En este capítulo se describe el equipo utilizado para el ensayo, incluyendo los instrumentos y características del canal del Laboratorio de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Se denota también la metodología seguida para la realización de los mismos. Luego se presenta los datos obtenidos durante las pruebas, tanto a nivel cuantitativo como cualitativo.

3.1 Descripción equipos

Se planteó la realización de ensayos en laboratorio que proporcionaran información sobre el comportamiento real de una rueda hidráulica en operación. A tal rueda se le aplicaría carga mecánica de manera progresiva, registrando en múltiples puntos lo que se denomina potencia al freno. La rueda de ensayo fue construida, en su mayor parte, en las instalaciones de la Casa Ecológica (PUCP) y sus medidas fueron adecuadas para que pudiera ser instalada en el canal de hidráulica perteneciente a la sección de Ingeniería Civil. Esta configuración permite controlar de manera bastante aproximada el caudal que incide sobre las paletas de la rueda y elaborar, para cada caso, las curvas de operación desde el inicio del giro hasta la detención total de la rueda. Para ello se registra medidas de velocidad angular y torque, el segundo de manera indirecta utilizando una configuración denominada freno Prony. Se describe a continuación los equipos utilizados para la realización de tales medidas.

3.1.1 Canal de ensayo

Para el ensayo de la rueda se utilizó el canal de Hidráulica perteneciente a la sección de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú (figura 3.1). Este canal tiene una sección constante en la que discurre un caudal de agua controlado mediante una válvula y un indicador de flujo. Posee además una compuerta regulable en la salida y tiene en toda su longitud rieles de aluminio alineados, en los se ubican los accesorios e instrumentos de medición.

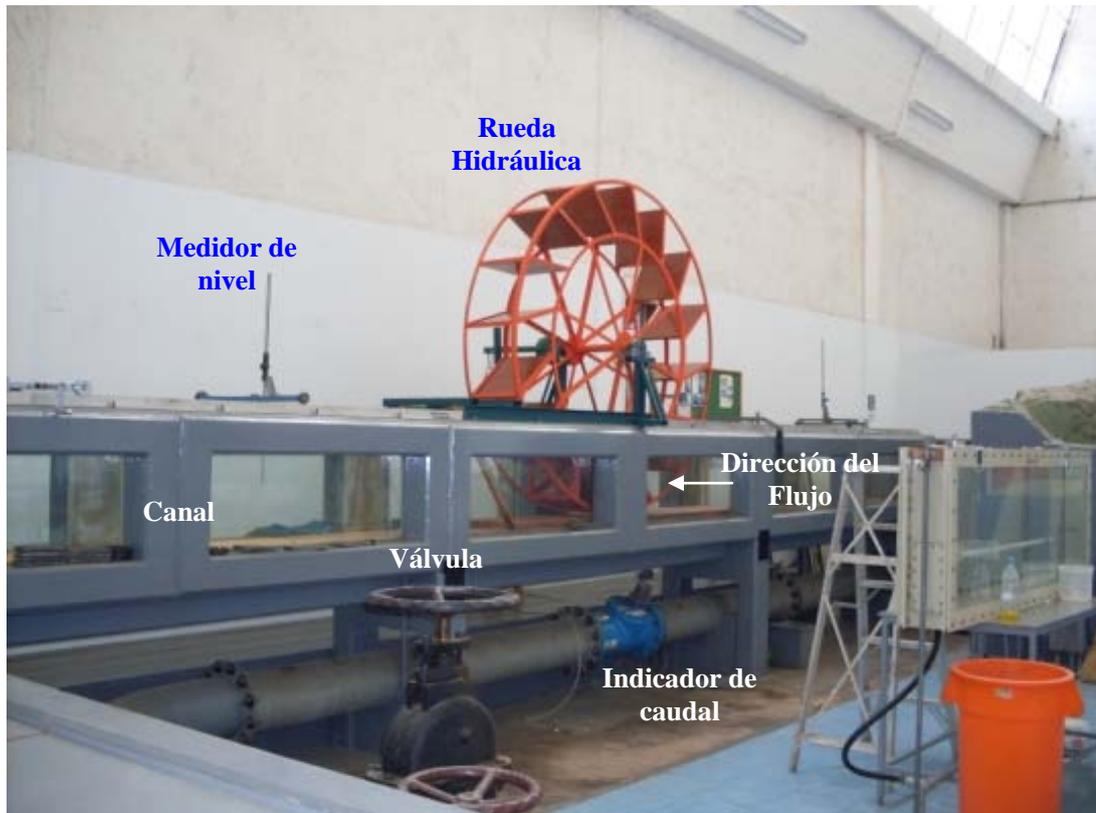


Figura 3.1: Canal de ensayo – Laboratorio de Hidráulica / PUCP

La sección del canal (figura 3.2) es constante y tiene un ancho de 40 cm por una altura máxima de 52 cm, sin embargo no suele utilizarse con elevaciones mayores a 40 cm. Esta elevación es en realidad función del caudal circulante y del nivel de apertura de la compuerta en la salida. En todos los ensayos se trabajó con la compuerta totalmente abierta, pues esto permite mayor rango de trabajo. Cuando la rueda empieza a recibir carga se produce un embalse en la zona de ingreso del canal hasta llegar a la rueda. Este embalse bordea el límite superior del canal para condiciones máximas de carga, por lo que manipulación adicional de la compuerta hubiera ocasionado fuga o derrame del agua por encima del canal.

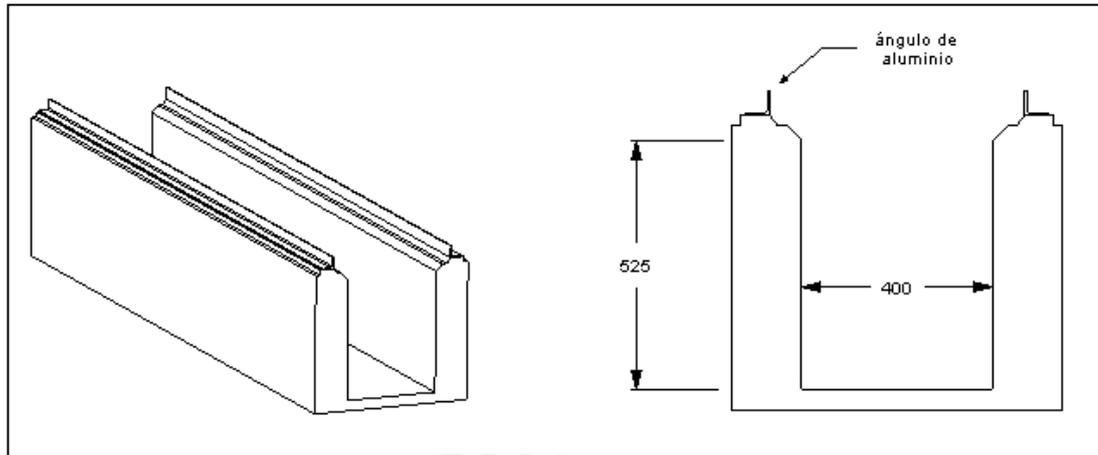


Figura 3.2: Sección del canal – medidas en mm

El canal está alimentado por el caudal procedente de una bomba (figura 3.3) ubicada a la salida de un pozo de almacenamiento. El motor que la acciona es de 6 HP de potencia e impulsa un caudal máximo de 75 lt/s de agua. El nivel de caudal circulante se visualiza en un medidor ubicado en la tubería de alimentación del canal (figura 3.4). Sus unidades son lt/s y tiene una graduación en incrementos de 5 lt/s.



Figura 3.3: Bomba Centrífuga de impulsión (Hidrostral – motor 6 HP)



Figura 3.4: Medidor de Caudal

Con la compuerta a la salida totalmente abierta, para evitar rebales, el control de caudal se realiza con una válvula manual (figura 3.5) ubicada a continuación de la bomba. Con esta configuración se consigue un canal de sección conocida y caudal regulable. La altura del nivel de agua se midió utilizando accesorios propios del canal, básicamente reglas verticales (figura 3.6), de las cuales se obtenía también una medida indirecta de velocidad, puesto que se conocía el nivel de caudal circulante y la sección del mismo. Esto, sin embargo, es válido solo cuando el flujo mantiene régimen laminar.



Figura 3.5: Válvula de control

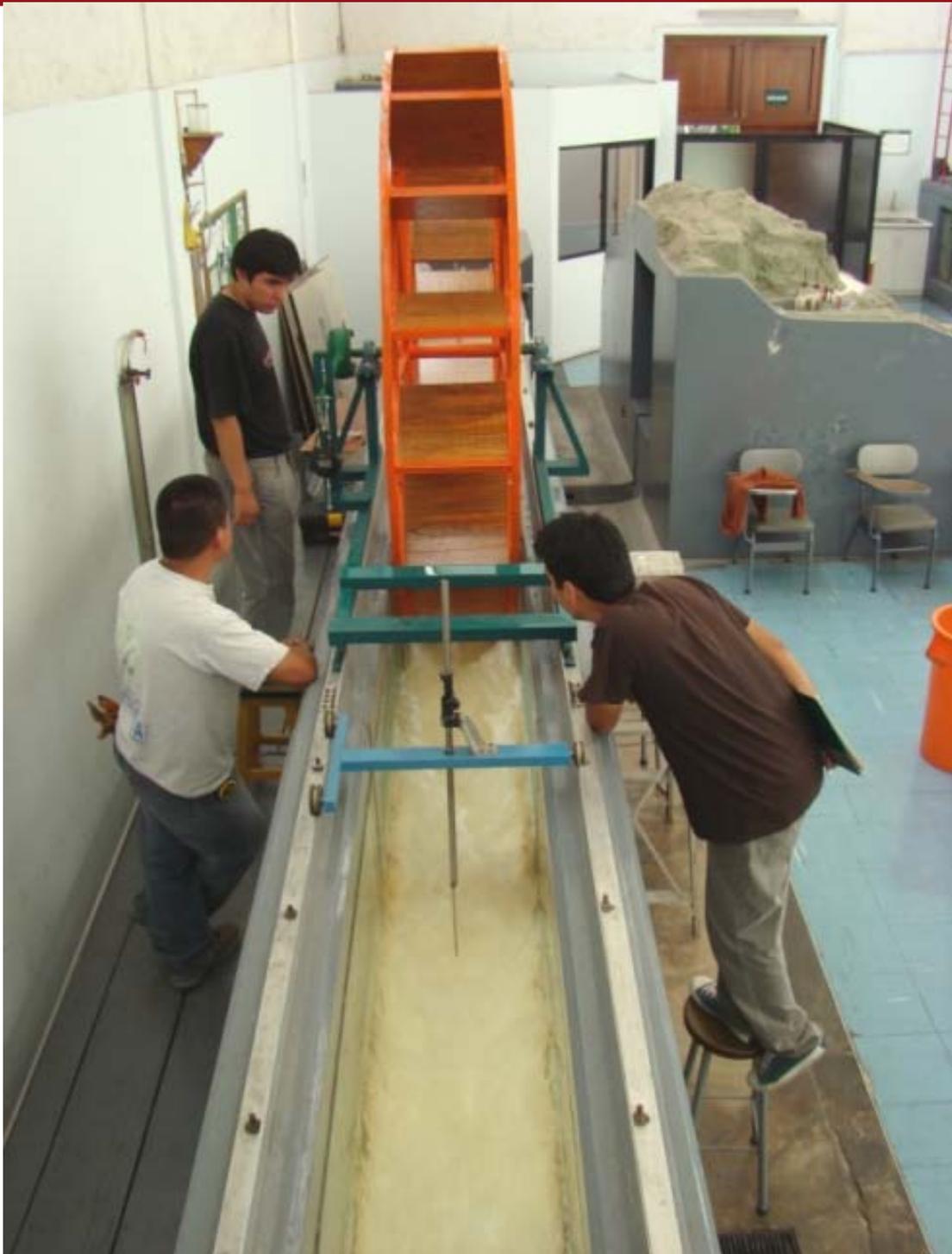


Figura 3.6: Canal de ensayo⁷ – Vista de frente

⁷ Un video de la rueda en operación puede encontrarse en el siguiente enlace:
<http://www.youtube.com/watch?v=KiMPsDhIPZQ>
bajo el título: “Rueda Hidraulica 2m mayo 2009 GRUPO PUCP”

3.1.2 Rueda Prototipo

Está basada en un modelo perteneciente a la Casa Ecológica (PUCP). Consiste en una armadura para la rueda propiamente dicha, construida en su mayor parte con barras angulares. Tiene en la parte central un tubo por donde encaja un eje de acero, desmontable, el cual reposa sobre chumaceras. Este conjunto (figura 3.7) es soportado por una base construida acorde a las dimensiones del canal.

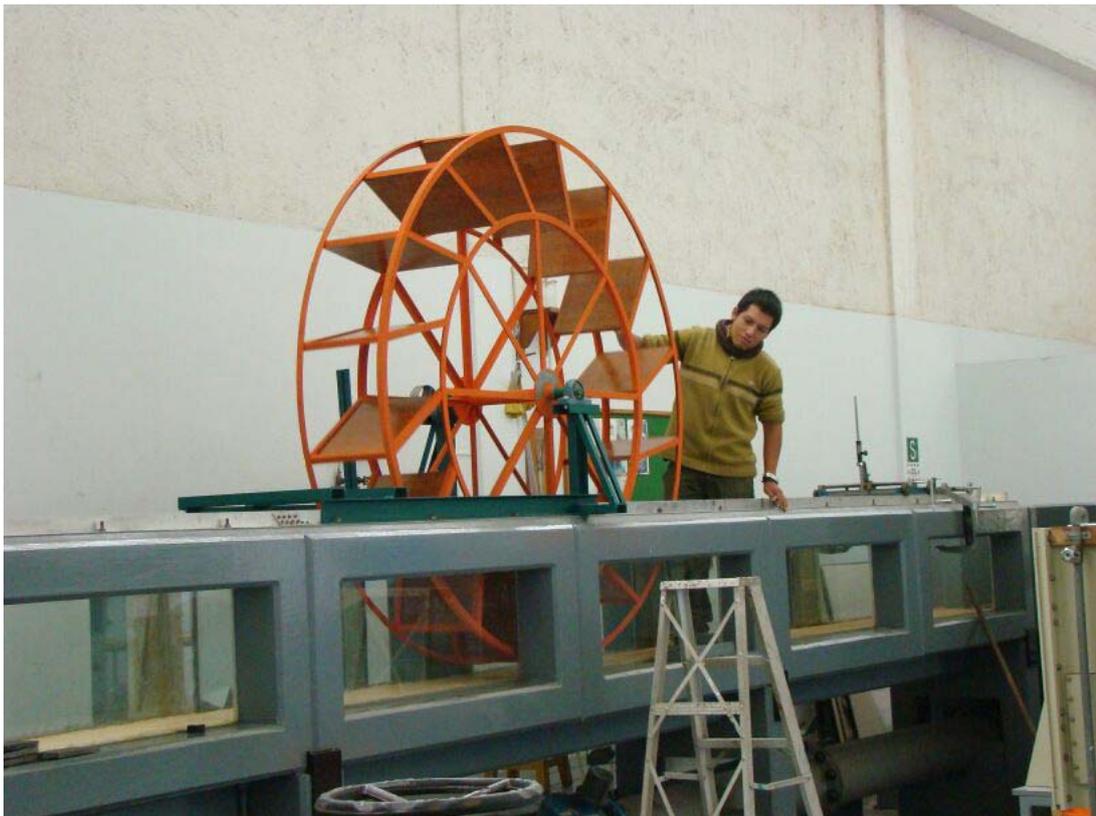


Figura 3.7: Rueda Prototipo instalada en Canal de Hidráulica - PUCP

La rueda está conformada por una armadura (figura 3.8) definida por cuatro anillos, hechos de barras angulares L de 1/8" roladas. Los anillos interiores tienen 65 cm de radio y los exteriores 100 cm. Estos están unidos mediante ocho radios (por lado) a un disco de 20 cm de diámetro (figura 3.9), el cual va unido a un tubo. Las uniones en todos los casos son mediante cordones de soldadura. Este armazón se une a un eje desmontable, el cual se asegura a la rueda mediante tornillos prisioneros, cuatro en total. La armadura contiene barras longitudinales al eje donde se apoyan las paletas.



Figura 3.8: Rueda Prototipo para ensayo: 2 m diámetro exterior

Los álabes de la rueda son tablas de madera tipo “tornillo” y sus dimensiones son 35 x 35 x 2 cm. Son 16 álabes en total, orientados a 28 grados de inclinación respecto al radio, y están unidos a la armadura mediante tornillos, utilizando cuatro por cada paleta. Se adoptó una proporción sugerida para ruedas hidráulicas [Tokashiki, 1989], enunciada así:

$$\text{Número de paletas} = \text{Diámetro exterior (en m)} \times 8$$

Entonces:

$$\text{Número de paletas} = 2 \times 8 = 16 \text{ paletas}$$

En relación al diámetro exterior (2 m), se adoptó la medida con el propósito de **observar el comportamiento de la estructura para dimensiones mayores**, ya que ésta fue tomada de un modelo más pequeño (0,6 m diámetro exterior). Se optó por construir una rueda de mayores dimensiones cuya inercia y rigidez fueran significativas, de manera que pudiera evaluarse, cualitativamente, el comportamiento de la estructura. Respecto al ancho de la rueda, estaba limitado por las dimensiones del canal (40 cm de ancho) en el cual debía encajar y girar

libremente. El ancho total de la rueda, considerando tolerancias constructivas, es de 37 cm.



Figura 3.9: Detalle unión Radios – Disco - Tubo

La rueda va unida al eje desmontable mediante tornillos prisioneros, y éste eje descansa sobre dos chumaceras de 1 ¼ "de medida nominal (figura 3.10).



Figura 3.10: Detalle unión Armadura – Eje – Chumacera

Estas dos chumaceras descansan sobre una base (figura 3.11) construida a partir de una barra de acero sección U de 3" de alma por 2" de ala. Esta base esta dimensionada de manera que se apoye sobre el canal, ajustándose al mismo mediante pernos pasantes.

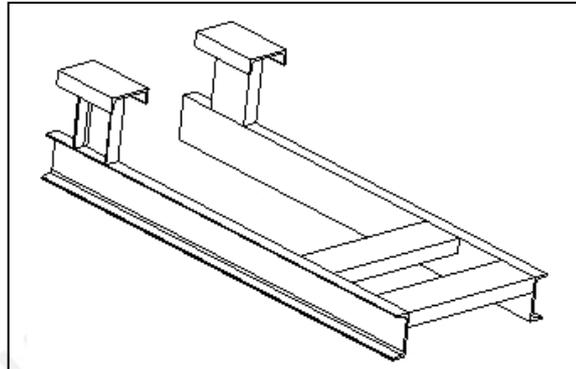


Figura 3.11: Esquema base soporte

Si bien se adoptó estas medidas (diámetro exterior 2 m, álabes 35 x 35 cm.) en función al canal, existen recomendaciones para la proporción entre las mismas; aunque son elaboradas teniendo en mente las ruedas hidráulicas de admisión superior "Overshot". Para el caso de la rueda de ensayo (eje horizontal, sumersión parcial) se pueden identificar las mismas dimensiones características (figura 3.12).

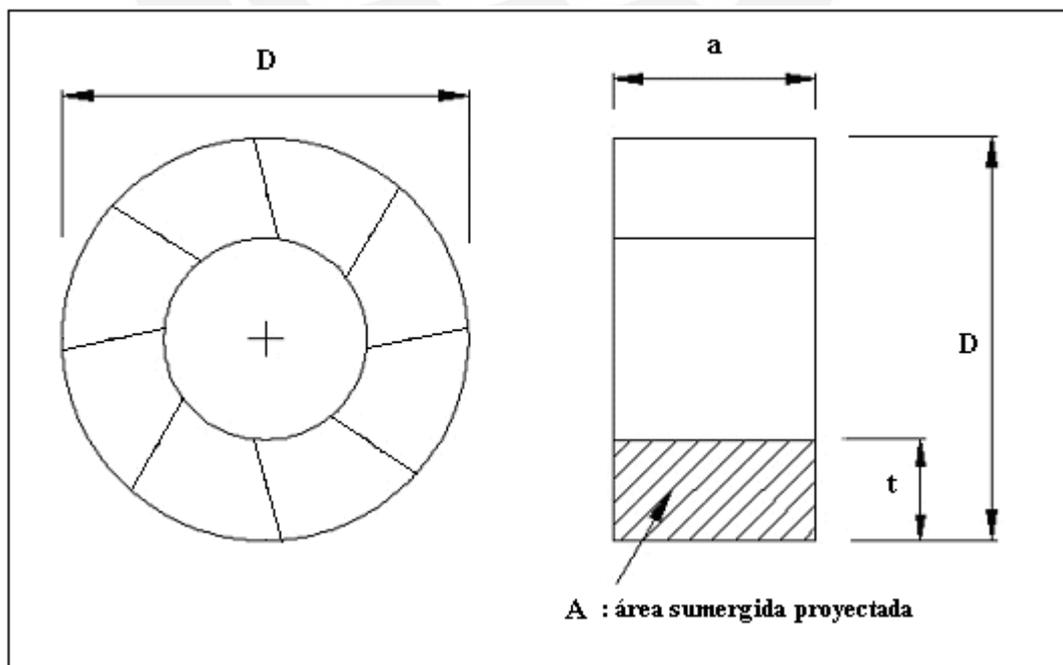


Figura 3.12: Proporciones – Rueda Hidráulica

El mismo autor [Tokashiki, 1989] recoge las siguientes recomendaciones:

$$0,025 < t / D < 0,125 \quad (3.1)$$

$$a < D/2 \quad (3.2)$$

Donde:

- t: altura de álabe
- D: Diámetro exterior
- a: ancho de álabe

La relación 3.1 presenta un rango empírico adoptado históricamente por los fabricantes de ruedas hidráulicas, asociado a condiciones de estabilidad. La relación 3.2 expresa los problemas estructurales que se pueden generar con ruedas muy anchas. En realidad, ambas restricciones pueden salvarse con una adecuada selección de materiales y dimensiones, acompañados del correspondiente análisis estructural. Puesto que el enfoque de este trabajo es el aspecto energético, no se adentrará más en tales aspectos constructivos.

3.1.3 Instrumentos de medida

Las variables de registro, o las variables a medir en el ensayo, son velocidad angular y torque. Para la velocidad angular se optó por utilizar un tacómetro de contacto (figura 3.13), cuyas especificaciones cubrían el rango bajo de revoluciones (menor a 10 RPM) con que se esperaba trabajar. Las características del tacómetro utilizado son (tabla 3.1):

Tabla 3.1: Tacómetro – datos técnicos

Fabricante	Control Company
Serie	4059
Resolución	0,1 RPM (0 a 999.9 RPM)
	1 RPM (1000 a 99999 RPM)
Tamaño	2,5 x 8,5 x 1.5 (pulgadas)
Peso	10,5 onzas

Durante el giro, el tacómetro se posicionaba en un extremo del eje que sobresalía de la rueda, realizándose las lecturas. Se realizaron múltiples tomas, para cada punto, considerando la variación propia del instrumento y de la rueda, anotando valores máximos y mínimos. Para los puntos más inestables, esta variabilidad alcanzó hasta 1 RPM de diferencia.



Figura 3.13: Tacómetro Control Company 4059

Para el registro del torque se optó por la configuración típica de un freno Prony (figura 3.14). Consiste en una volante unida rígidamente al eje sobre la cual se ejerce un elemento de frenado (pastilla, cinta, etc.). Este freno se aplica de manera progresiva, generando un torque de frenado equivalente a un nivel de carga mecánica. Dicho torque es registrado por una balanza (actuando como dinamómetro) ubicada en un extremo del brazo de freno. Considerando la distancia del brazo y la medida indicada por la balanza se obtiene una medida sencilla del torque de carga aplicado sobre la rueda.

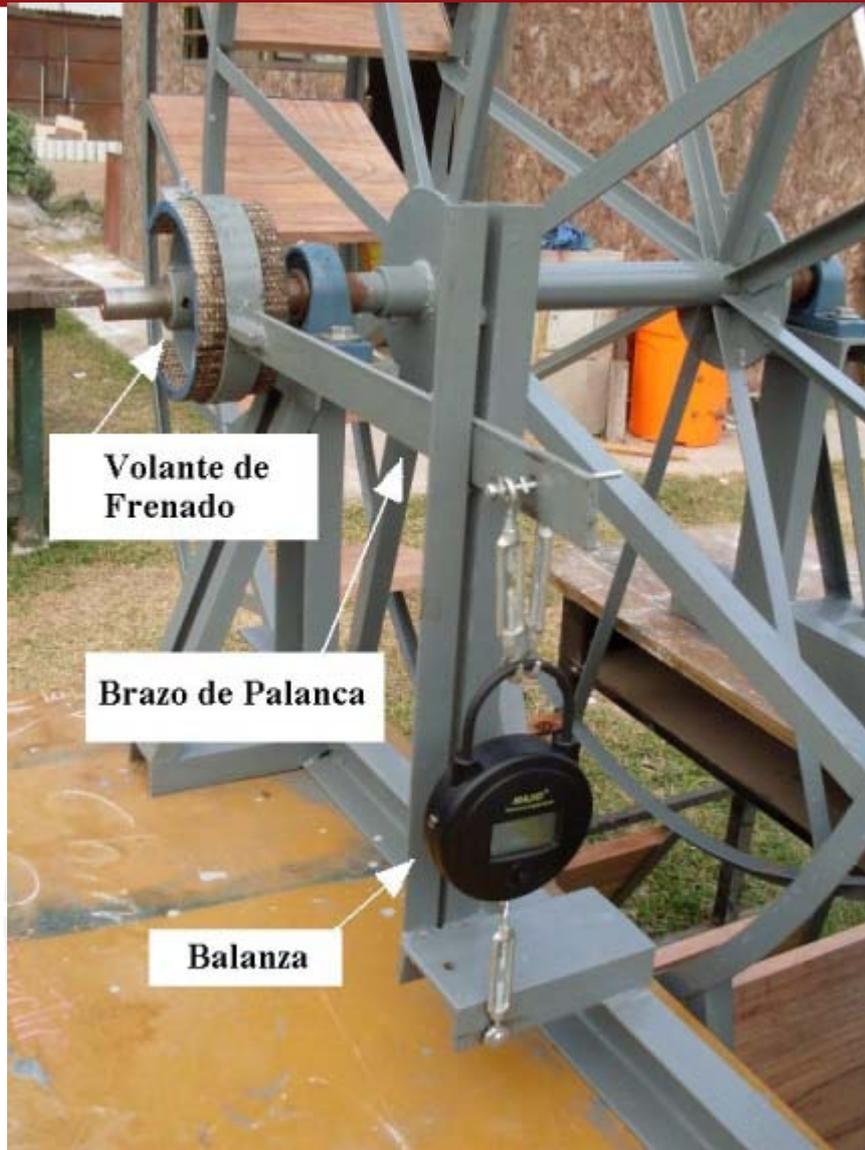


Figura 3.14: Sistema freno tipo Prony

Para que el efecto de ajuste fuera progresivo se utilizó una faja de frenado cuya fricción con la volante aumentaba con el ajuste de un tornillo ubicado en un extremo del brazo. Este ajuste se aplicaba mediante una llave que actuaba sobre una tuerca (figura 3.15).



Figura 3.15: Freno – Sistema de ajuste

La balanza utilizada fue del tipo digital, que trabaja en el rango de 0 – 25 kg y tiene una graduación de 10 gr. de incremento. La longitud del brazo de palanca es de 97 cm, con la balanza ubicada en el extremo derecho del brazo (figura 3.16).



Figura 3.16: Balanza

3.2 Metodología del ensayo

Se elaboró el ensayo en función de la regulación del caudal y la sensibilidad de los equipos. Los puntos iniciales de medida se establecieron durante la realización del ensayo, tomando en cuenta la respuesta del tacómetro y de la balanza, así como la estabilidad de la medida registrada.

En líneas generales, se registró la potencia consumida por la rueda desde el inicio del giro hasta la parada, ello para diferentes caudales incidentes sobre la rueda (figura 3.17).

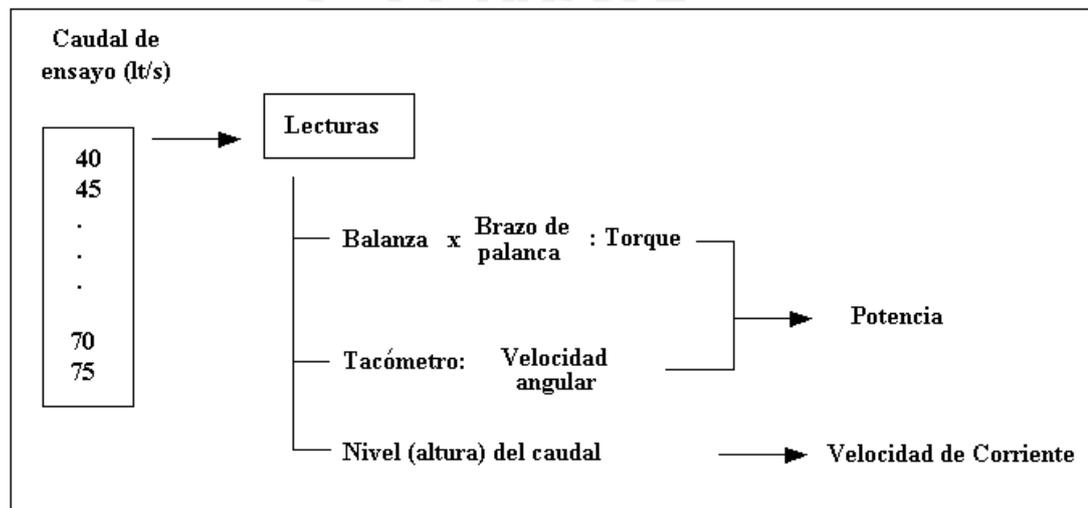


Figura 3.17: Metodología de ensayo

La variable de control fue el caudal circulante, el cual se regulaba mediante una válvula manual y el registro visual del indicador de caudal. Se trabajó con incrementos de 5 lt/s empezando en 40 lt/s y terminando en 75 lt/s (máximo del canal).

Como se indicó anteriormente, para cada nivel de caudal circulante se registró, de manera progresiva, la velocidad angular y el torque de carga en el eje iniciando en el punto de carga mínima (cero) y máxima velocidad hasta el punto de parada, con carga máxima y velocidad nula. Este conjunto de puntos determina una curva de carga que relaciona el torque producido por la rueda y la velocidad angular a la que era entregado. El producto de los factores mencionados indicaba la potencia real útil entregada por la rueda.

Las lecturas tomadas fueron:

- La medida de la balanza, en kilogramos, la cual multiplicada por el respectivo brazo de palanca indica el torque de carga en la rueda.
- La lectura del tacómetro, en RPM, la cual indica la velocidad angular de giro.
- El nivel de altura del caudal circulante. Toda vez que se conoce la sección del flujo es posible estimar la velocidad de corriente promedio, siempre y cuando esta velocidad sea transversal a la sección. Se registró el nivel tanto al ingreso como a la salida de la rueda.

3.3 Toma de Datos

Se registraron cuatro variables en total:

1. Nivel de altura de agua en el ingreso (mm)
2. Nivel de altura de agua a la salida (mm)
3. Lectura del tacómetro, medido directamente sobre el eje (RPM)
4. Lectura de la balanza digital (kg)

Para las últimas dos variables registradas (en el tacómetro y la balanza) se consideró dos medidas: mínima y máxima, puesto que los valores indicados no eran fijos. Los valores registrados corresponden a puntos relativamente estables, lo cual se producía con caudales superiores a 40 lt/s y torques de cargas superiores a 15 Nm (aproximadamente).

3.3.1 Datos Cuantitativos

A continuación se transcriben los resultados obtenidos durante los ensayos. Se indica sólo las medidas obtenidas y las respectivas unidades. La correspondientes

variables asociadas se analizarán de manera directa en el capítulo 4, en el ítem referido a las curvas de operación. Se muestra aquí (tabla 3.2) los valores registrados⁸ y los promedios utilizados para el análisis posterior.

- Q : Caudal circulante en el canal
- $\Delta 1$: Nivel de agua al ingreso (figura 3.18)
- $\Delta 2$: Nivel de agua a la salida (figura 3.18)
- ω : Velocidad angular (mínimo, máximo, promedio)
- F : Lectura de la balanza (mínimo, máximo, promedio)

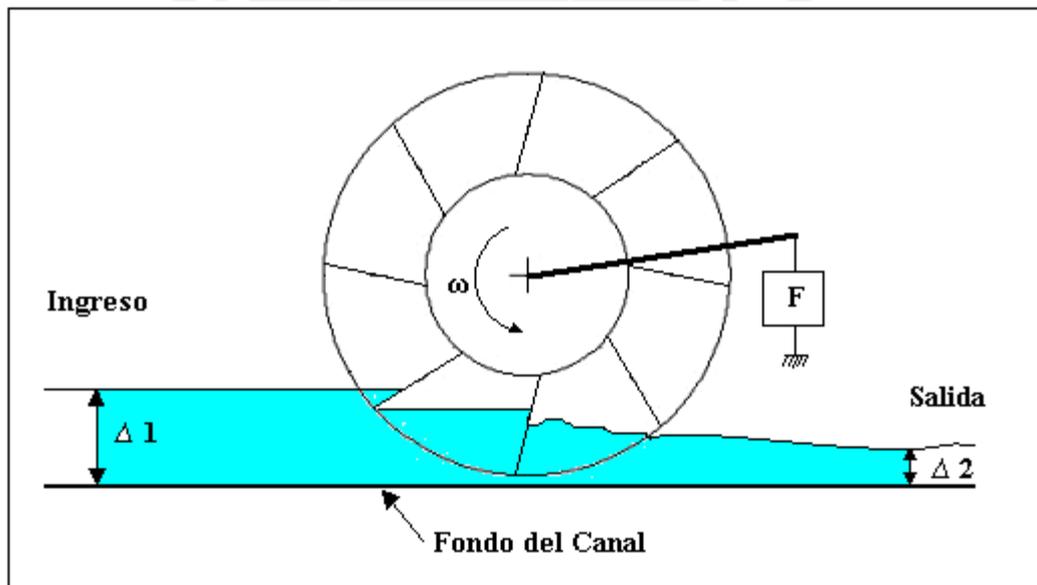


Figura 3.18: Nivel de agua al ingreso y salida de la rueda hidráulica

⁸ Los valores indicados en la tabla 3.2 corresponden al promedio de una serie completa de ensayos utilizando la configuración descrita anteriormente. Se ensayó otras configuraciones, utilizando compuerta de admisión, accesorio de nivelación, diferente brazo de palanca (en el freno) y diferente forma de álabe. Dichas configuraciones no produjeron resultados satisfactorios, considerando nivel de estabilidad, rango de operación cubierto y confiabilidad de medidas; por lo que no han sido incluidas en este trabajo.

Tabla 3.2: Datos registrados

Fluido:			Rueda:					
Q (lt/s)	$\Delta 1$ (mm)	$\Delta 2$ (mm)	ω min (rpm)	ω max (rpm)	ω prom (rpm)	F min (kg)	F max (kg)	F prom (kg)
40	183	110	2.6	3.3	2.95	0.31	0.44	0.38
40	206	149	2.0	1.3	1.65	1.79	2.33	2.06
40	214	157	1.0	1.5	1.25	2.28	3.13	2.71
40	231	174	0.5	0.5	0.50	3.38	4.01	3.70
40	236	179	0.0	0.0	0.00	5.00	5.24	5.12
45	203	124	3.6	4.2	3.90	0.48	0.80	0.64
45	221	124	2.2	2.7	2.45	2.01	2.97	2.49
45	243	124	1.5	2.2	1.85	3.18	3.29	3.24
45	267	80	0.6	1.3	0.95	4.66	6.44	5.55
45	300	56	0.0	0.0	0.00	9.13	9.39	9.26
50	210	130	3.3	3.8	3.55	0.81	1.13	0.97
50	229	128	2.5	3.2	2.85	2.42	3.19	2.81
50	245	127	1.7	2.5	2.10	3.46	4.80	4.13
50	257	132	1.5	2.2	1.85	4.93	5.51	5.22
50	272	180	1.4	1.7	1.55	5.96	6.75	6.36
50	286	172	0.7	1.5	1.10	6.03	7.87	6.95
50	310	172	0.0	0.0	0.00	9.08	9.78	9.43
55	227	139	3.5	4.2	3.85	1.54	1.78	1.66
55	249	135	2.5	3.2	2.85	3.11	3.57	3.34
55	264	136	2.2	2.7	2.45	4.03	4.83	4.43
55	278	136	1.8	2.5	2.15	5.17	6.15	5.66
55	295	88	1.3	1.8	1.55	7.14	7.90	7.52
55	307	88	0.8	1.5	1.15	8.71	9.38	9.05
55	352	66	0.0	0.0	0.00	13.06	13.16	13.11
60	237	148	4.3	4.8	4.55	1.38	1.86	1.62
60	247	148	3.8	4.3	4.05	2.14	2.52	2.33
60	271	145	2.9	3.8	3.35	4.17	4.86	4.52
60	282	147	2.6	3.5	3.05	4.71	5.47	5.09
60	305	137	2.0	2.8	2.40	7.29	7.71	7.50
60	319	96	1.5	2.2	1.85	8.00	8.91	8.46
60	334	96	1.1	1.9	1.50	8.43	10.12	9.28
60	362	92	0.6	1.1	0.85	10.93	12.65	11.79
60	392	72	0.0	0.0	0.00	13.08	16.58	14.83
65	237	155	5.1	5.6	5.35	1.00	1.23	1.12
65	249	154	4.5	5.2	4.85	1.66	2.10	1.88
65	280	154	3.4	4.2	3.80	3.82	4.08	3.95
65	303	154	2.7	3.3	3.00	5.90	6.97	6.44
65	325	104	2.0	2.8	2.40	8.70	9.73	9.22
65	341	104	1.5	2.5	2.00	10.93	11.22	11.08

Fluido:			Rueda:					
Q (lt/s)	$\Delta 1$ (mm)	$\Delta 2$ (mm)	ω min (rpm)	ω max (rpm)	ω prom (rpm)	M min (kg)	M max (kg)	F prom (kg)
65	358	88	1.3	2.3	1.80	11.60	12.90	12.25
65	378	88	0.9	1.5	1.20	13.90	15.25	14.58
65	418	79	0.0	0.0	0.00	18.06	19.32	18.69
70	267	157	4.5	4.8	4.65	2.57	3.22	2.90
70	292	157	3.4	4.2	3.80	4.24	4.95	4.60
70	317	157	2.8	3.2	3.00	6.38	7.43	6.91
70	344	113	2.3	3.1	2.70	7.96	10.41	9.19
70	378	103	1.4	1.8	1.60	13.99	14.24	14.12
70	404	92	0.8	1.3	1.05	16.07	17.37	16.72
70	429	80	0	0	0.00	18.87	19.63	19.25
75	263	169	6.2	6.3	6.25	0.80	1.07	0.94
75	273	169	5.2	5.5	5.35	2.61	2.97	2.79
75	294	169	4.2	4.6	4.40	4.75	5.10	4.93
75	318	162	3.3	4.2	3.75	5.52	6.60	6.06
75	340	169	2.8	3.6	3.20	7.61	8.94	8.28
75	357	115	2.6	2.9	2.75	10.00	11.00	10.50
75	373	110	1.8	2.4	2.10	13.42	14.12	13.77
75	407	90	1.4	2.2	1.80	15.9	16.28	16.09
75	422	96	1.0	1.5	1.25	17.65	18.20	17.93
75	456	86	0	0	0.00	22.11	23.57	22.84

3.3.2 Comportamiento cualitativo

La rueda presentó un giro uniforme y estable (figura 3.18), exceptuando los puntos correspondientes al inicio del giro y punto de parada. No se presentan vibraciones y la rueda no produce ruidos, exceptuando el asociado a la aplicación del freno. El conjunto es sumamente rígido y no se observan deformaciones en ningún punto de la estructura.



Figura 3.18: Rueda en funcionamiento

Se apreció un clásico régimen laminar en el tramo de ingreso y un régimen turbulento en el tramo de salida (figura 3.19). Era notoria la formación de un rebalse en este primer tramo (figura 3.20), el cual aumentaba con el incremento del nivel de carga (freno) sobre la rueda. En el segundo tramo (figura 3.21), el régimen turbulento indicaba componentes de velocidad en el plano transversal a la dirección del flujo. Respecto al nivel (o altura) se mantenía estable y en cierta manera era independiente del nivel de carga.

La lectura del nivel del agua a la salida se realizó de manera muy aproximada, pues éste variaba considerablemente en relación al punto donde se hiciera la toma; lo cual no ocurría en el tramo de ingreso donde el régimen laminar permitía una lectura más estable y precisa. Por ello, la ponderación de velocidad que se hiciera en el segundo tramo no sería representativa respecto a la velocidad total resultante del flujo.

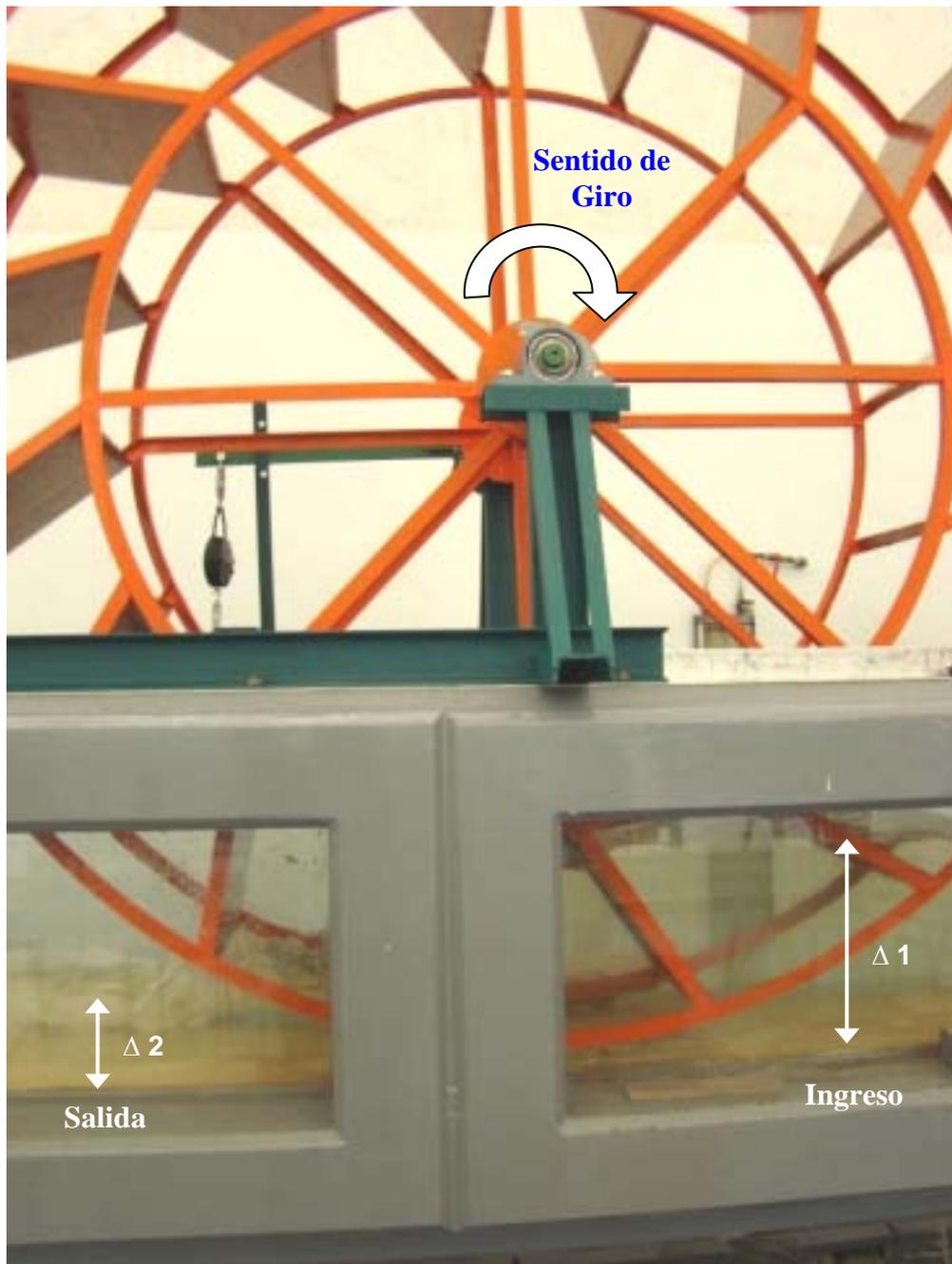


Figura 3.19: Nivel al ingreso y salida de la rueda hidráulica

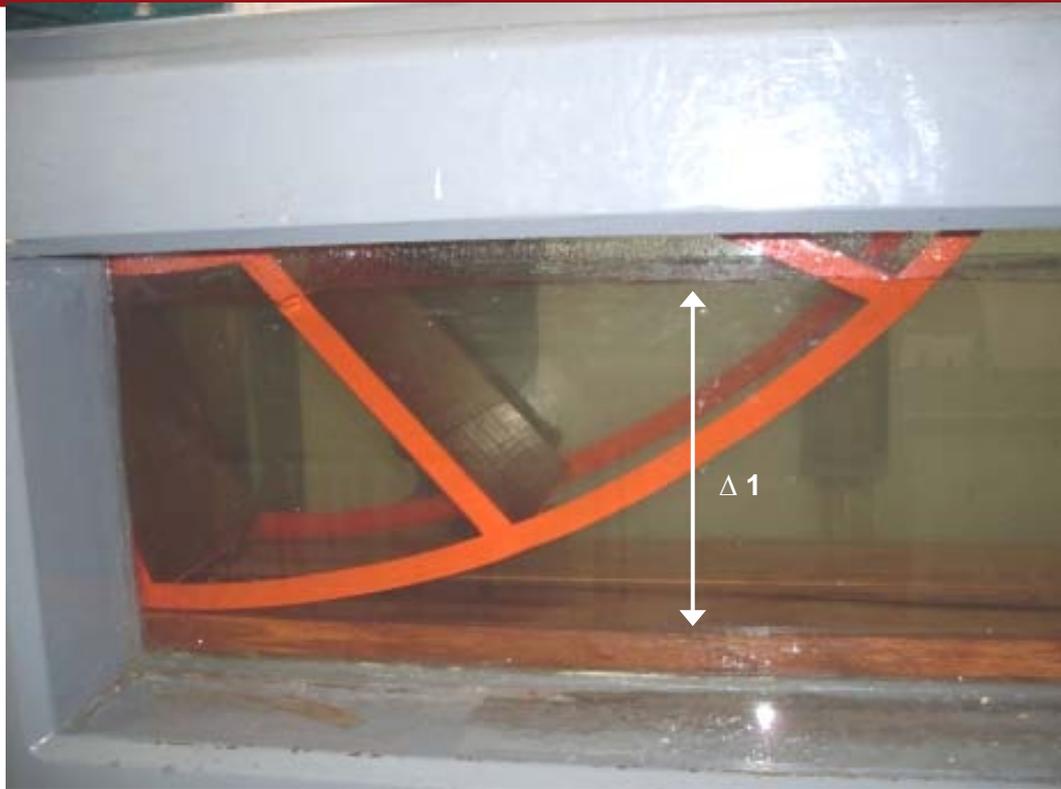


Figura 3.20: Régimen laminar en el ingreso

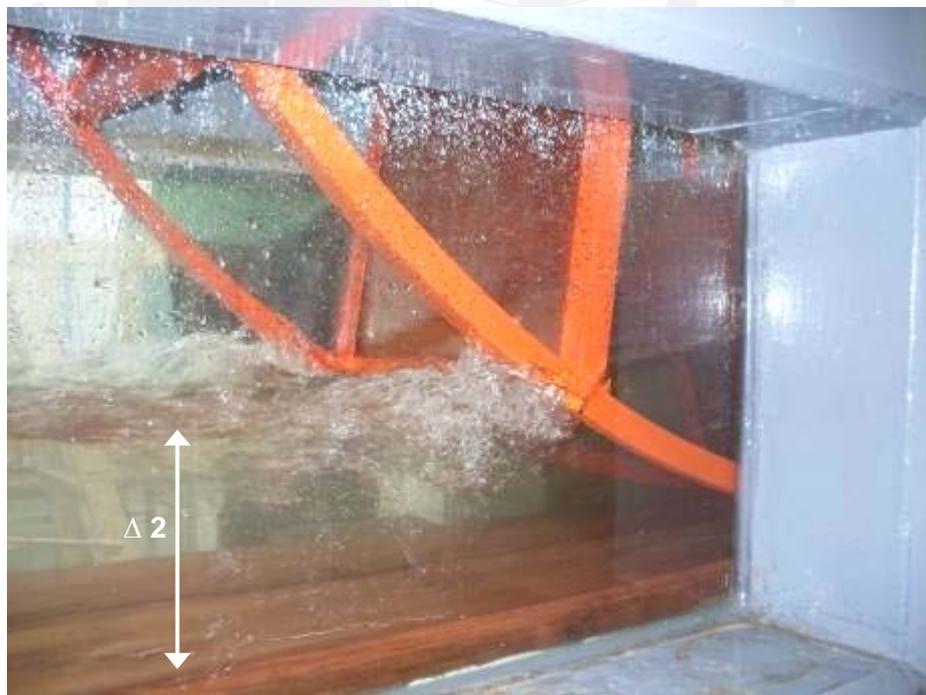


Figura 3.21: Régimen turbulento en la salida

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan, tabulados y de manera gráfica, las curvas de operación correspondientes a la rueda ensayada. Se evalúa la potencia y el torque en relación al caudal de accionamiento y al régimen de giro. Asimismo, se analiza la relación de estos resultados respecto a la fórmula propuesta en el capítulo 2. Por último, se describen aspectos constructivos del equipo de ensayo, tanto a nivel de materiales como de mecanizado.

4.1 Curvas de Operación

El propósito principal del ensayo fue obtener medidas reales del torque y la potencia generados por una rueda hidráulica instalada en una corriente libre, cuyo valor de caudal y velocidad de corriente fueran conocidos. Para el caso de la velocidad angular, se pudo obtener medidas directas, en RPM, mediante el uso de un tacómetro de contacto aplicado directamente en el eje de la rueda. La medida del torque efectivo se realizó de manera indirecta, mediante la lectura del nivel de carga indicada en un balanza y considerando el brazo de palanca aplicada en la misma.

Los valores obtenidos de estas variables fueron tabuladas en el capítulo anterior. Para efectos de cálculo y análisis se toma los valores promedio y se realiza la transformación correspondiente con las lecturas de la balanza y el brazo de palanca para obtener los valores de torque en el eje. Se trabaja con las dos variables de registro: velocidad angular y torque, y se representa también la potencia mecánica efectiva en el eje en función al caudal incidente sobre la rueda.

4.1.1 Potencia, Torque vs. Caudal de accionamiento

Se tabula a continuación los resultados obtenidos. La tabla 4.1 muestra las características del caudal circulante por el canal **antes de instalar la rueda**. Se utilizó en este caso las medidas de nivel de agua para calcular la sección transversal y la velocidad de corriente promedio. Esta velocidad se utiliza después para evaluar el potencial teórico de la rueda. El ancho del canal (constante) es de 40 cm.

Tabla 4.1: Características del caudal circulante (sin rueda)

Caudal (lt/s)	Nivel (mm)	Sección de canal (m ²)	Velocidad de corriente promedio (m/s)
20	90	0.0360	0.598
25	105	0.0420	0.645
30	115	0.0460	0.705
35	125	0.0500	0.763
40	136	0.0544	0.795
45	143	0.0572	0.851
50	152	0.0608	0.888
55	164	0.0656	0.903
60	173	0.0692	0.930
65	181	0.0724	0.966
70	191	0.0764	0.985
75	198	0.0792	1.012

Con las medidas tabuladas en el capítulo 3 se calculó el torque efectivo y la potencia real en el eje (tabla 4.2). Para el cálculo de la potencia teórica ideal se utilizó la expresión 2.3 tomando en cuenta la velocidad de corriente correspondiente al caudal de trabajo (tabla 4.1) y el área transversal efectiva de contacto entre la paleta y el flujo. Esta última procede del cálculo de la sección del álabe definido por el ancho del mismo (35 cm) y la altura del nivel de agua.

Con los valores de velocidad angular, torque, potencia real y potencia teórica ideal se calcula el valor del coeficiente de ajuste C_a utilizando la ecuación 2.4. Se indica también el porcentaje del área de paleta sumergido para cada punto. Se presentan además gráficas de las siguientes curvas: Torque vs. Velocidad angular y Potencia mecánica real vs. Velocidad angular.

Estas gráficas fueron elaboradas utilizando hojas de cálculo Excel y corresponden a diagramas de dispersión. Se ha utilizado un ajuste polinomial de grado 4 para conectar los puntos y mostrar la tendencia de las curvas⁹.

Es necesario tener en cuenta que los valores de potencia teórica ideal consideran la velocidad de corriente antes de instalar la rueda (tabla 4.1), pero la sección de contacto se establece con la rueda instalada y operando. La velocidad de corriente del canal antes de instalar la rueda es el referente del potencial energético del flujo, mientras que las velocidades de ingreso y salida de la rueda son producto del nivel de carga, siendo menor en el ingreso (rebalse) y mayor en el desfogue (nivel bajo).

Como se señaló anteriormente, se trabajó con caudales en el rango 40 – 75 lt/s. Valores menores de caudal produjeron lecturas muy erráticas y régimen de giro inestable. Los incrementos en carga se establecieron en el momento del ensayo, en función de la respuesta de la balanza.

⁹ Para las gráficas de Torque, Potencia y Coeficiente de ajuste vs. velocidad de giro se utilizó un ajuste polinomial de grado 4, siendo $R^2 > 0.95$ para todos los casos (baja dispersión).

Tabla 4.2: Torque, velocidad angular, potencia efectiva, coeficiente de ajuste

Caudal (lt/s)	Nivel entrada (mm)	Nivel salida (mm)	Velocidad angular (rpm)	Carga en balanza (kg)	Velocidad angular (rad/s)	Torque (Nm)	Potencia efectiva (W)	Potencia teórica (W)	Ca	Área sumergida % del total
40	183	110	2.95	0.38	0.309	3.61	1.12	13.89	0.08	46
40	206	149	1.65	2.06	0.173	19.58	3.38	15.92	0.21	53
40	214	157	1.25	2.71	0.131	25.76	3.37	16.62	0.20	56
40	231	174	0.50	3.70	0.052	35.17	1.84	18.11	0.10	61
40	236	179	0	5.12	0	48.67	0	18.55	-	62
45	203	124	3.90	0.64	0.408	6.08	2.48	19.20	0.13	52
45	221	124	2.45	2.49	0.257	23.67	6.07	21.14	0.29	58
45	243	124	1.85	3.24	0.194	30.80	5.97	23.51	0.25	65
45	267	80	0.95	5.55	0.099	52.76	5.25	26.10	0.20	72
45	300	56	0	9.26	0	88.03	0	29.66	-	82
50	210	130	3.55	0.97	0.372	9.22	3.43	22.67	0.15	54
50	229	128	2.85	2.81	0.298	26.71	7.97	25.00	0.32	60
50	245	127	2.10	4.13	0.220	39.26	8.63	26.96	0.32	65
50	257	132	1.85	5.22	0.194	49.62	9.61	28.43	0.34	69
50	272	180	1.55	6.36	0.162	60.46	9.81	30.27	0.32	74
50	286	172	1.10	6.95	0.115	66.07	7.61	31.98	0.24	78
50	310	172	0	9.43	0	89.64	0	34.92	-	85
55	227	139	3.85	1.66	0.403	15.78	6.36	26.03	0.24	60
55	249	135	2.85	3.34	0.298	31.75	9.48	28.86	0.33	66
55	264	136	2.45	4.43	0.257	42.11	10.81	30.80	0.35	71
55	278	136	2.15	5.66	0.225	53.80	12.12	32.60	0.37	75
55	295	88	1.55	7.52	0.162	71.49	11.60	34.79	0.33	81

Caudal (lt/s)	Nivel entrada (mm)	Nivel salida (mm)	Velocidad angular (rpm)	Carga en balanza (kg)	Velocidad angular (rad/s)	Torque (Nm)	Potencia efectiva (W)	Potencia teórica (W)	Ca	Área sumergida % del total
55	307	88	1.15	9.05	0.120	86.03	10.36	36.34	0.29	84
55	352	66	0	13.11	0	124.62	0	42.14	-	98
60	237	148	4.55	1.62	0.477	15.40	7.34	29.84	0.25	63
60	247	148	4.05	2.33	0.424	22.15	9.39	31.25	0.30	66
60	271	145	3.35	4.52	0.351	42.97	15.07	34.63	0.44	73
60	282	147	3.05	5.09	0.319	48.39	15.46	36.18	0.43	77
60	305	137	2.40	7.50	0.251	71.30	17.92	39.41	0.45	84
60	319	96	1.85	8.46	0.194	80.42	15.58	41.38	0.38	88
60	334	96	1.50	9.28	0.157	88.22	13.86	43.50	0.32	93
60	362	92	0.85	11.79	0.089	112.08	9.98	47.44	0.21	100
60	392	72	0	14.83	0	140.97	0	51.66	-	100
65	237	155	5.35	1.12	0.560	10.65	5.97	33.44	0.18	63
65	249	154	4.85	1.88	0.508	17.87	9.08	35.34	0.26	66
65	280	154	3.80	3.95	0.398	37.55	14.94	40.23	0.37	76
65	303	154	3.00	6.44	0.314	61.22	19.23	43.85	0.44	83
65	325	104	2.40	9.22	0.251	87.65	22.03	47.33	0.47	90
65	341	104	2.00	11.08	0.209	105.33	22.06	49.85	0.44	95
65	358	88	1.80	12.25	0.189	116.45	21.95	52.53	0.42	100
65	378	88	1.20	14.58	0.126	138.60	17.42	55.69	0.31	100
65	418	79	0	18.69	0	177.67	0	62.00	-	100
70	267	157	4.65	2.90	0.487	27.57	13.43	40.47	0.33	72
70	292	157	3.80	4.60	0.398	43.73	17.40	44.65	0.39	80
70	317	157	3.00	6.91	0.314	65.69	20.64	48.83	0.42	88
70	344	113	2.70	9.19	0.283	87.36	24.70	53.35	0.46	96

Caudal (lt/s)	Nivel entrada (mm)	Nivel salida (mm)	Velocidad angular (rpm)	Carga en balanza (kg)	Velocidad angular (rad/s)	Torque (Nm)	Potencia efectiva (W)	Potencia teórica (W)	Ca	Área sumergida % del total
70	378	103	1.60	14.12	0.168	134.22	22.49	59.04	0.38	100
70	404	92	1.05	16.72	0.110	158.94	17.48	63.38	0.28	100
70	429	80	0	19.25	0	182.99	0	67.57	-	100
75	263	169	6.25	0.94	0.655	8.94	5.85	43.17	0.14	71
75	273	169	5.35	2.79	0.560	26.52	14.86	44.98	0.33	74
75	294	169	4.40	4.93	0.461	46.86	21.60	48.79	0.44	80
75	318	162	3.75	6.06	0.393	57.61	22.62	53.14	0.43	88
75	340	169	3.20	8.28	0.335	78.71	26.38	57.13	0.46	95
75	357	115	2.75	10.50	0.288	99.81	28.75	60.22	0.48	100
75	373	110	2.10	13.77	0.220	130.90	28.79	63.12	0.46	100
75	407	90	1.80	16.09	0.189	152.95	28.83	69.29	0.42	100
75	422	96	1.25	17.93	0.131	170.44	22.31	72.01	0.31	100
75	456	86	0	22.84	0	217.12	0	78.17	-	100

Torque Vs. RPM

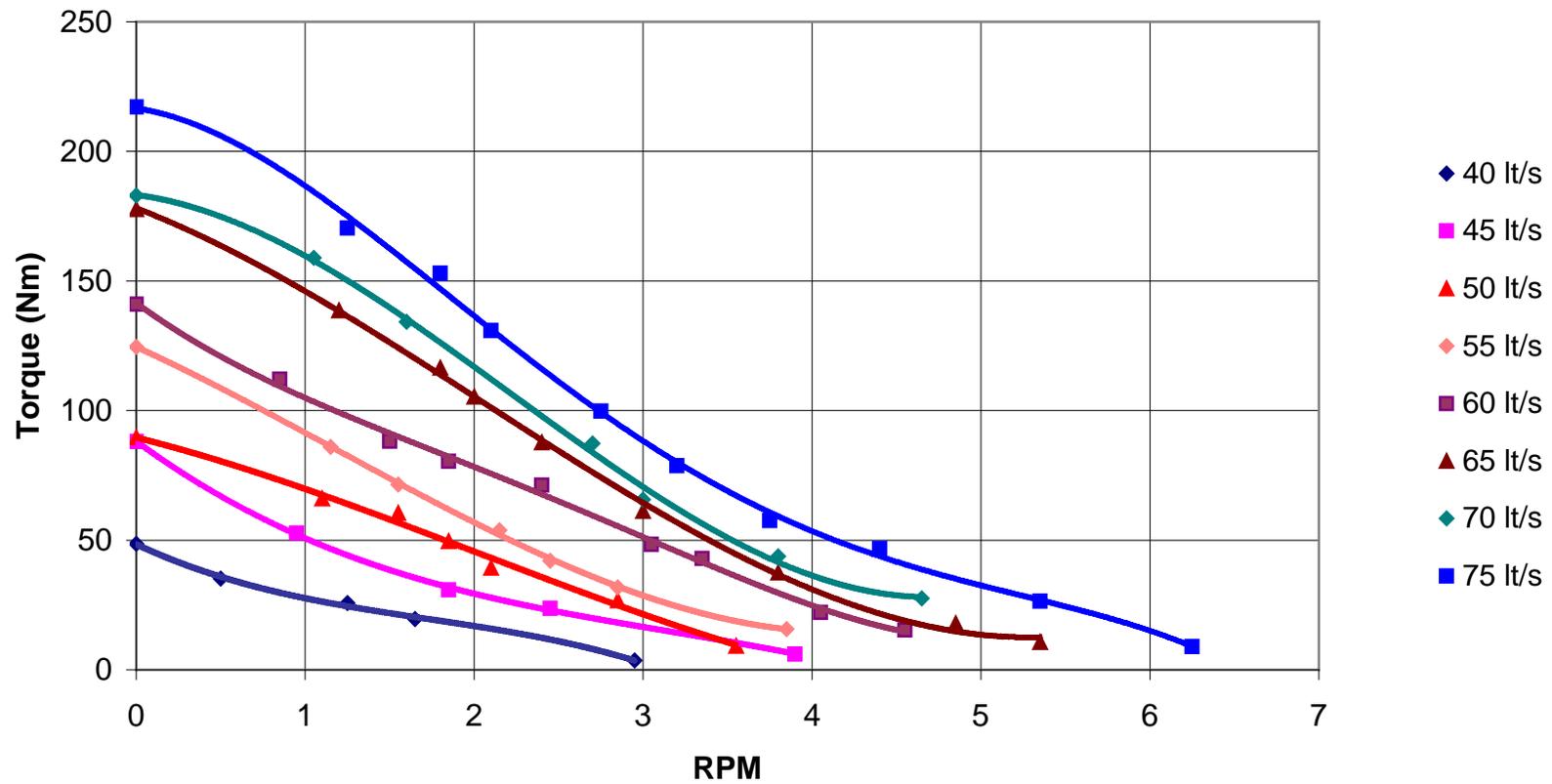


Figura 4.1: Torque vs. Velocidad angular (ajuste polinomial)

Potencia real Vs. RPM

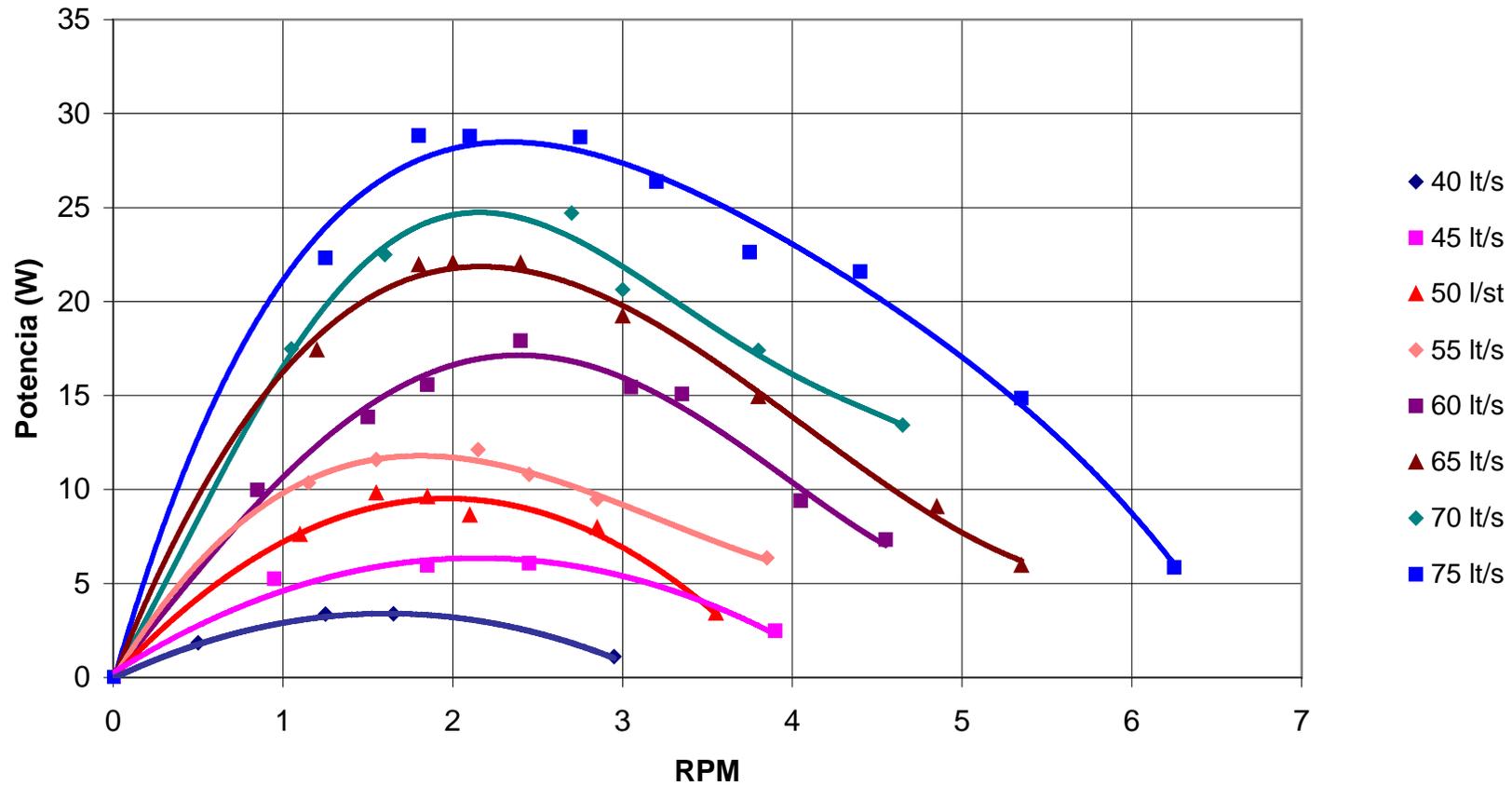


Figura 4.2: Potencia real vs. Velocidad angular (ajuste polinomial)

Rueda Hidráulica – Diámetro: 2 m

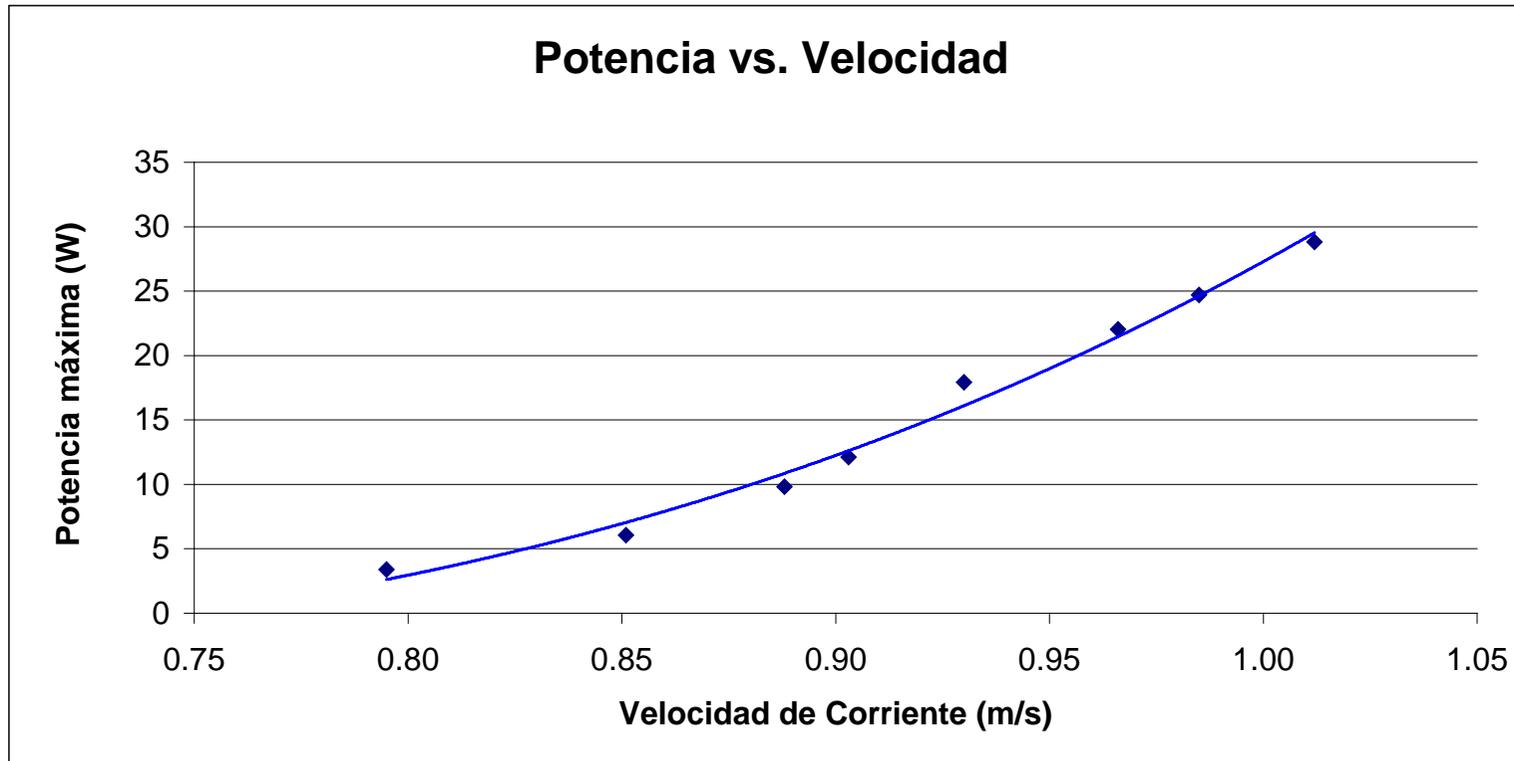


Figura 4.3: Potencia real máxima vs. Velocidad de corriente para la rueda de ensayo: 2 m de diámetro exterior, 16 álabes de 35 x 35 cm, inclinación de 28° (nota: los valores de potencia máximos se dieron con diferentes valores de área de álabes sumergida)

4.1.2 Coeficiente de Ajuste

Con los valores de coeficiente de ajuste de la tabla 4.2 se elaboraron curvas de C_a vs. Velocidad angular. Estos valores representan en gran medida la acertividad de la relación teórica ideal propuesta (ecuación 2.3) y denotan valores comprendidos en el rango 0,2 – 0,5

Estos valores alcanzan máximos en puntos que no necesariamente corresponden a los de potencia máxima. Sin embargo, en muchos casos se presentan ambos en el mismo punto, el cual corresponde además al de álabe totalmente sumergido. Bajo esta tendencia, puede decirse que el incremento progresivo del área sumergida produce un incremento análogo de la potencia extraída sin que ello disminuya significativamente la eficiencia de la transferencia energética (figura 4.6).

A medida que se incrementa el caudal circulante, el valor máximo de C_a se presenta a una mayor proporción de área de álabe utilizada. Por encima de 70 lt/s el máximo rendimiento se da con todo el álabe sumergido, lo cual genera también la potencia máxima efectiva.

Para mayores incrementos de carga se produce un frenado intermitente que finaliza con la detención total de la rueda. En este punto el torque ejercido por el eje es máximo, pero la ausencia de giro implica una potencia efectiva igual a cero.

Ca Vs. RPM

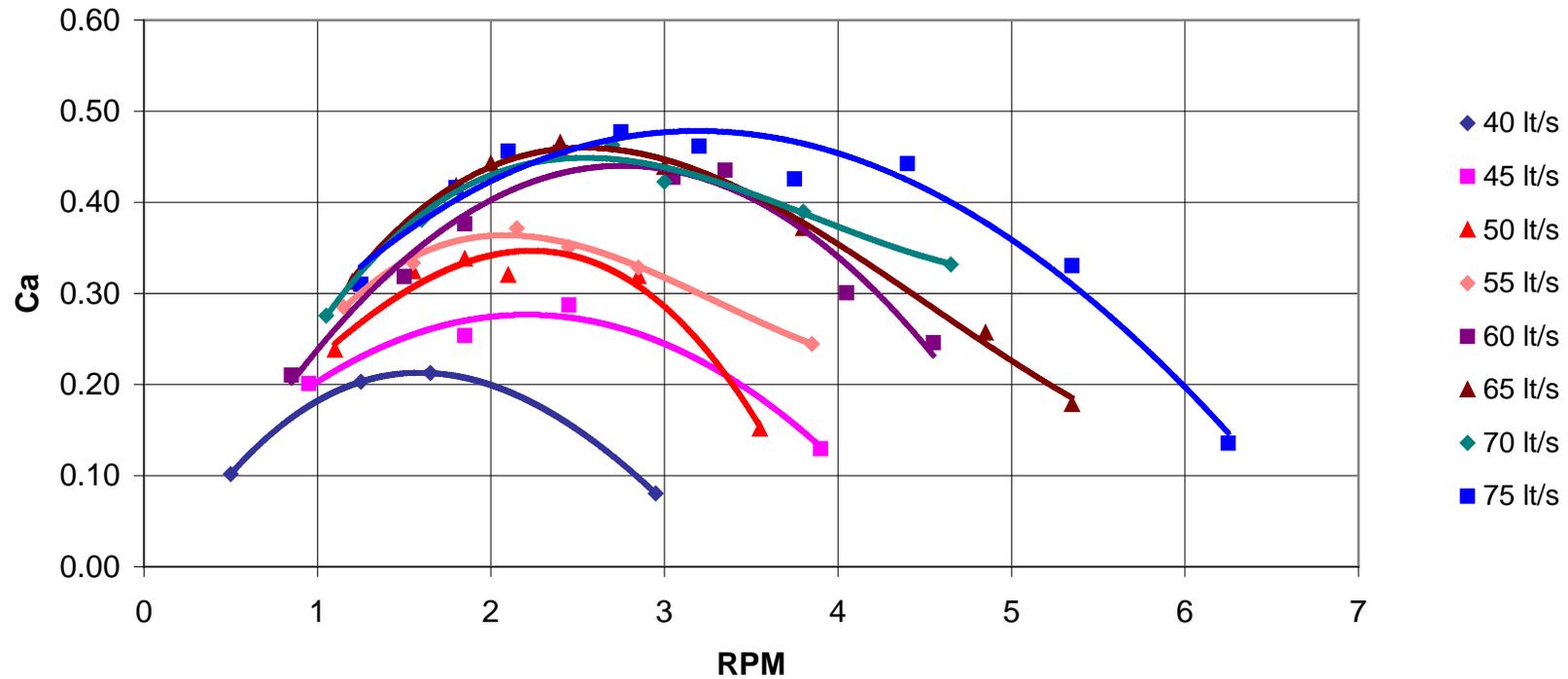


Figura 4.4: Coeficiente de Ajuste vs. Velocidad angular (ajuste polinomial)

4.1.3 Potencia mecánica real en el eje

La expresión 2.3 planteada inicialmente ponderaba un valor teórico ideal de la potencia mecánica generada en la rueda hidráulica. La expresión 2.5 adiciona un componente denominado coeficiente de ajuste C_a el cual compatibiliza esta expresión ideal con el comportamiento real de la rueda.

De los resultados extraídos del ensayo se observa que los valores del C_a oscilan entre **0,2 a 0,5** (adimensionales) para los caudales ensayados. Estos valores son cercanos a los sugeridos por el texto de Emilio Mayorga en el documento “Riobomba: Una alternativa de riego para zonas rurales”, donde establece valores entre 0,3 y 0,4 para ruedas de paletas planas. En contraste, el valor sugerido por CEPIS: 0,81 para el C_a es muy elevado y no se consigue con la configuración de la rueda de ensayo.

En general, esta expresión ideal parece corresponder de manera bastante aproximada al comportamiento real de la rueda, considerando los valores de ajuste (C_a) propios de la rueda, que ponderan todos los demás factores que no han sido considerados individualmente. Para efectos de evaluación preliminar, las pruebas sustentan la validez de la expresión planteada y sugieren, mediante los valores C_a obtenidos, un potencial mayor al esperado.

$$P_{real} = C_a \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3) \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Para la rueda de ensayo construida se define la siguiente expresión para el cálculo de potencia efectiva en el eje, considerando que será válida para canales con flujos superiores a 75 lt/s y velocidad de corriente superior a 1 m/s:

$$P_{real} = 240 \cdot A \cdot V^3$$

Donde:

P_{real} : Potencia mecánica real en la rueda¹⁰ (W)

A: Área sumergida proyectada de la rueda (m²)

V: Velocidad de corriente: entre 0 a 2 m/s en canales naturales o artificiales

¹⁰ El factor 240 resulta de multiplicar el C_a máximo obtenido (0,48) por el factor 0,5 por la densidad aproximada del agua: $0,48 \times 0,5 \times 1000 = 240$

4.1.4 Condiciones óptimas

“...para la rueda de impuso (Pelton), puede notarse que para cualquier apertura de carga, la potencia máxima y la eficiencia máxima ocurren a la misma velocidad y tal valor de eficiencia máxima no varía considerablemente...” [Sheperd, 1971]

Como se mencionó anteriormente, existe una relación creciente entre la potencia extraída y el área de álabe sumergida (tabla 4.3). Además, el valor del coeficiente de ajuste óptimo no suele estar muy distante del punto de potencia máxima. En tal sentido, un incremento de área, siempre que la disposición física lo permita, incrementará la potencia real extraíble de la rueda.

En relación a los puntos óptimos, la única tendencia observada puede establecerse con la **relación de velocidades entre la rueda y la corriente**.

Respecto a la velocidad de la rueda se considera la velocidad tangencial en el extremo, definida por la velocidad angular del eje (en rad/s) multiplicada por el radio de la rueda. Este producto se denominará velocidad tangencial de la rueda:

V = Velocidad de corriente

V_t = Velocidad angular x Radio de la rueda = Velocidad tangencial de la rueda

Entonces:

Relación de velocidades = $V / V_t = \lambda$

Esta relación, denominada celeridad en la bibliografía asociada a aerogeneración, sirve de referente para establecer una proporción bajo la cual se obtiene el máximo rendimiento de la rueda hidráulica.

Tabla 4.3: Ca máximo vs. Relación de velocidades

Caudal (lt/s)	Velocidad corriente (m/s)	Velocidad tangencial (m/s)	λ	Ca máximo	% álabe sumergido
40	0.795	0.173	4.60	0.21	53
45	0.851	0.257	3.31	0.29	58
50	0.888	0.194	4.58	0.34	69
55	0.903	0.225	4.01	0.37	75
60	0.930	0.251	3.51	0.45	84
65	0.966	0.251	3.85	0.47	90
70	0.985	0.283	3.48	0.46	96
75	1.012	0.288	3.51	0.48	100

Si se examina los puntos en que se obtienen un mayor valor de Ca (tabla 4.2), se notará que éstos se dan para relaciones de velocidades (λ) comprendidas entre 3.3 y 4.6. Este rango puede sugerir una zona de trabajo óptima, donde se extrae la mayor cantidad de potencia con la máxima eficiencia.

4.2 Aspectos constructivos

A continuación se mencionan algunos aspectos relacionados con la construcción del equipo utilizado para el ensayo. Son observaciones recogidas durante la adquisición de materiales y los mecanizados requeridos para construir la rueda hidráulica.

4.2.1 Materiales

La opción de utilizar barras angulares de acero respondía a la necesidad de evaluar el comportamiento de la estructura aplicada a ruedas de gran tamaño (superior a 2 m de diámetro exterior). Esto implica disponer de herramientas apropiadas de corte y equipo de soldadura. Dado que se trabajó con una armadura sólida, también implicaba considerar la posibilidad de transportar el conjunto al lugar de ensayo.

Las ruedas hidráulicas se construyen con diversos materiales, siendo el acero y la madera los más utilizados. El primero, con el cual se construyó el equipo usado en el ensayo, implica mayor costo tanto en materiales como mecanizado. Tiene por

beneficio una mayor rigidez estructural y bajo condiciones adecuadas de revestimiento una mayor durabilidad.

En relación a las paletas, se optó por utilizar tablas de madera tipo tornillo¹¹, pues se conseguía así elementos relativamente rígidos de menor peso y manipulación mas sencilla. Se aplico una base de barniz para mejorar la impermeabilidad, pero no se garantiza la operatividad de este material a largo plazo. Una selección adecuada de maderas es necesaria cuando estas estén dirigidas a regímenes prolongados de trabajo.

El peso total del equipo: rueda, base, instrumentos fue de aproximadamente 150 kg.

4.2.2 Mecanizado y ensamble

Se utilizó en mayor medida corte y soldadura. Se requirió taladrado para algunas secciones de la base y torneado para el eje. Los anillos que definían el perfil de la rueda fueron rolados en barra tipo L de 1/8", pero pudo haberse optado por formas poligonales, lo cual hubiera requerido mayor precisión en el ensamble.

El eje desmontable se fijó a la armadura de la rueda mediante tornillos prisioneros. Para mayores niveles de torque y potencia esta unión podría resultar insuficiente. Exceptuando eso, la rigidez estructural del conjunto fue notable y no se presentaron vibraciones o deformaciones de ningún tipo.

En relación al tiempo de construcción, se estima que el equipo podría construirse en su totalidad en aproximadamente dos semanas, siempre que los materiales estén disponibles con la debida celeridad, y se tenga dos personas (como mínimo) a dedicación exclusiva.

¹¹ Esta madera tiene amplia disponibilidad, bajo costo y rigidez aceptable por lo que se utilizó en la rueda de ensayo. Fue sin embargo el factor disponibilidad el que más primó en esta opción.

CONCLUSIONES

- La expresión de potencia real planteada: $P_{real} = Ca \cdot P_{ideal} = Ca \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3)$ se ajusta de manera muy aproximada al comportamiento observado en la rueda hidráulica. Sin embargo, esta expresión tiene carácter empírico, porque considera la velocidad de corriente inicial del canal (previa a la instalación de la rueda) y el área de contacto que se establece después de instalar la rueda. La velocidad del flujo incidente, en las proximidades de la rueda, es menor a la velocidad inicial medida en el canal sin rueda.
- El coeficiente de ajuste Ca máximo que relaciona la potencia ideal con la potencia real se encuentra comprendido en el rango de 0,2 a 0,5 acorde a los datos obtenidos en laboratorio.
- Para efectos de estimación, la expresión descrita anteriormente produce resultados bastante cercanos al comportamiento real de una rueda hidráulica, y considera tanto la sección de las paletas como la velocidad de corriente previa a la instalación de la rueda.

$$P_{real} = Ca \cdot P_{ideal} = Ca \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3)$$

Donde:

P_{real} : Potencia mecánica real en la rueda (W)

Ca : Coeficiente de ajuste: entre 0,2 a 0,5 según pruebas en laboratorio

ρ : densidad del agua: aproximadamente 1000 kg/m³

A : Área sumergida proyectada de la rueda (m²)

V : Velocidad de corriente (m/s)

- De manera general, la potencia máxima entregada (29 W) se produjo a un régimen de giro entre 2 y 3 rpm; ello para una rueda de 2 m de diámetro exterior, con 16 paletas de 35 x 35 cm e inclinación de 28°.

RECOMENDACIONES

- Es necesario realizar un ensayo similar en una corriente de mayores proporciones, donde la sección del canal sea muy superior al área de paleta. Bajo estas condiciones sería útil verificar la validez de la expresión anteriormente planteada y extraer el rango de valores para el coeficiente de ajuste.
- La cantidad de puntos registrados estuvo limitado por la sensibilidad de los instrumentos de medición usados. Para ensayos similares es recomendable utilizar balanzas analógicas, de peso reducido, y adicionar mecanismos para una medición más precisa de la velocidad angular de la rueda.
- La rueda ensayada utilizó paletas de dimensiones y ángulo de inclinación constante. Una rueda de ensayo que permita alterar tales valores permitiría un mayor número de pruebas y una extensión mas generalizada de las conclusiones derivadas de ellas.
- Ruedas hidráulicas de álabes curvos suelen producir incrementos de eficiencia respecto a las de álabes rectos. Un ensayo adicional realizado con álabes curvos no reportó mejoras en ningún aspecto, pero los cambios estructurales introducidos en la rueda impiden establecer una comparación en igualdad de condiciones. De corroborarse esta observación, con ensayos más rigurosos, se concluiría que los álabes curvos no incrementan la potencia extraíble en ruedas hidráulicas de eje horizontal de sumersión parcial.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta J., (1996). Diseño de un sistema de bombeo de 120 m/día a una altura de 30 m, mediante turbina de corriente libre, Tesis, PUCP, Lima
2. Córdova R., Breve historia de las turbinas hidráulicas, UCA, El Salvador.
3. Coz F., (1995). Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas – Una guía para el desarrollo de proyectos, ITDG, Lima.
4. Cuenca N., (2003). Minicentrales Hidroeléctricas flotantes de aprovechamiento cinético, Universidad Politécnica de Madrid.
5. Faires V., (1962). Termodinámica, Mexico.
6. Gorla R., (2003). Turbomachinery: design and theory, Marcel Dekker, New York.
7. Herrera J., (1990). Turbinas hidráulicas, Tesis, PUCP, Lima.
8. Maldonado F., (2005). Diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán - Región Loreto, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
9. Mataix C., (1986). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, 2° ed., Harla, México.
10. Ovens W., (1975). A design manual for water wheels: with details for applications to pumping water for village use and driving small machinery, Volunteers in Technical Assistance, Arlington.
11. Polo M., (1975). Turbomáquinas hidráulicas: principios fundamentales, Limusa, México.
12. Serván R., (1990). Turbina de la corriente libre para bombeo de agua, Tesis, PUCP, Lima.

13. Shepherd D., (1971). Principles of turbomachinery, 10th ed., Macmillan, Toronto.
14. Sviatoslav K., (1978). Diseño Hidráulico, Ed. MIR, Moscú.
15. Tokashiki L., (1989). Bombeo de agua utilizando ruedas hidráulicas, Tesis, PUCP, Lima.
16. Verdant Power Canada ULC, (2006). Technology Evaluation of Existing and Emerging Technologies - Water Current Turbines for River Applications, Natural Resources Canada.

