

ANEXO F. MÉTODO EXPERIMENTAL

1.1 MONTAJE Y MODELOS SIMPLES DE PRUEBA #1: EXPLORACIÓN DE TIPOS DE ROTOR

Con base en los modelos teóricos se construyó un modelo de cada tipo de rotor (Propela y rueda hidráulica), para ser analizado experimentalmente.

1.1.1 Objetivo general

Comparar dos tipos de rotores, e identificar cual de los dos era el más óptimo en términos de potencia, facilidad de construcción y montaje.

1.1.2 Objetivos específicos

- Seleccionar un tipo de rotor (rueda o propela) mediante el desarrollo de un experimento exploratorio.
- Comparar dos tipos de rotores bajo las mismas condiciones experimentales. Concluir cual es el más eficiente en relación Potencia generada Vs. Área de arrastre, entre otros factores incluidos en la Matriz ponderada de evaluación.
- Comprobar la veracidad de los modelos teóricos, para definir si son confiables en la determinación de datos para dimensionar el sistema real.

1.1.3 Variables y constantes

- Forma del aspa – variable
- Área de barrido (m^2) - constante
- Velocidad del fluido (m/s)- constante
- Carga en el eje (Fuerza, N)- Variable

1.1.4 Base de comparación

- Torque (Nm) vs velocidad angular (rpm).
- Potencia (vatios) vs velocidad angular (rpm).
- Tiempo de montaje.

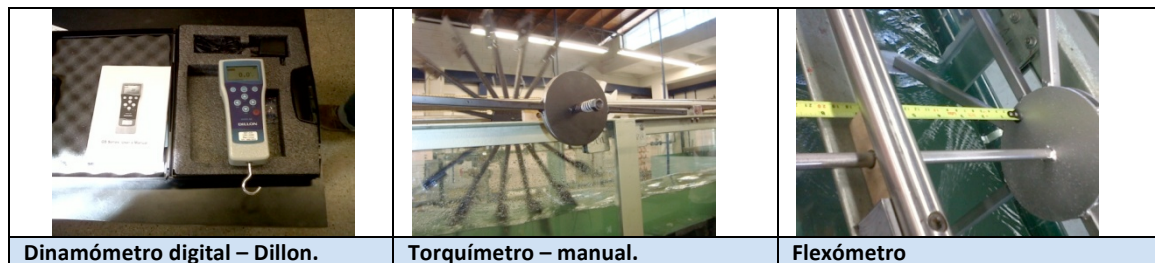
1.1.5 Equipos e instrumentos requeridos

- Canal de hidráulica.
- Torquímetro.*

- Dinamómetro.
- Cronometro.
- Tacómetro.
- Escuadra y flexometro.

*Torquímetro: Instrumento para aplicar carga a la turbina, que funciona bajo el principio de Freno Proney. Este consta de dos discos concéntricos que giran sobre un eje, cada uno con una barra de 30 cm de largo, a uno de los discos se le adecua un mandril de taladro para asegurar el eje a medir, mientras que el otro disco tiene un sistema de tornillo el cual sirve de eje para ubicar un resorte de k conocida, y longitud regulable, por medio de una tuerca. Para hacer la medición se ubica un dinamómetro en un extremo de la barra y se mide la fuerza, dicha fuerza multiplicada por la distancia de 30 cm de la barra (donde se ubica el dinamómetro), arroja el dato de torque.

Ilustración 1. Instrumentos de medición.



Fuente. Elaboración propia.

1.1.6 Pasos

1. Ubicar el rotor en el canal de hidráulica.
2. Encender el canal hasta alcanzar la velocidad de fluido máxima a una altura de 40 cm.
3. Medir las revoluciones por minuto del rotor libre.
4. Aplicar fuerza en el eje del rotor (utilizando el torquímetro), aumentando progresivamente la carga hasta detenerlo.
5. Medir revoluciones por minuto para cada escenario de fuerza.
6. Medir torque estático.
7. Repetir el anterior procedimiento para el segundo rotor.

1.1.7 Montaje

Ilustración 2. Localización de los rotores en el canal.



Fuente. Elaboración propia.

1.1.8 Descripción

Con base en los modelos teóricos expresados, se realizó un análisis dimensional para construir dos modelos simples de prueba A y B. (Ver tablas 1y 2) El Modelo A: rotor tipo rueda hidráulica, y el Modelo B: un rotor tipo propela.

Tabla 1. Análisis Dimensional Modelo A

Análisis Dimensional Modelo A		
Parámetro	Valor	Unidades
V	1,5	[m/s]
H	0,115	[m]
g	9,8	[m/s ²]
D	0,660	[m]
D _w	0,545	[m]
P _e	1,72	[m]
S	0,115	[m]
z	16	#
η _r	95%	#
n	49,85	[rpm]
ω	5,22	[rad/s]
L	0,1	[m]
A	0,011	[m ²]
Q	0,017	[m ³ /s]
ρ	1000	[kg/m ³]
Ph	19,37	[W]
Peje	18,40	[W]
τ	3,7	[Nm]

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 2. Análisis Dimensional Modelo B

Análisis Dimensional Modelo B		
Parámetro	Valor	Unidades
D	0,12	[m]
A	0,011	[m ²]

θ	20	[grados]
v	1,5	[m/s]
ρ	1000	[kg/m ³]
P_d	19,085	[W]
η_r	95%	#
P_{eje}	18,13	[W]

Fuente. Elaboración propia.

Con base en el análisis dimensional, se construyo un rotor con 66 cm de diámetro y 16 aspas con palas sumergibles en policarbonato de 10 cm² de área de arrastre.(ver ilustración 2)

Para el modelo de la Propela se uso una comercial encontrada en el mercado, con un *área de arrastre* de 10 cm² y se adaptó a ella un eje que permitiera ubicarla en el canal.(ver ilustración 2)

El área de arrastre fue el parámetro en común que hacia comparable los dos tipos de rotores.

Para la medición del torque dinámico en el eje del rotor, se requería un instrumento especial, el cual no fue posible conseguir en el mercado local, debido a ello se realizó la construcción previa de un torquímetro. (Ver ilustración 1)

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT, y se realizó un montaje experimental para cada Modelo.(ver ilustración 2)

1.1.9 Imprevistos

La pala del Modelo A, no se pudo sumergir completamente, debido a que el agua en el canal solo alcanzaba una altura determinada que no era suficiente para sumergir completamente la pala. Por tal motivo se sumergió 8 cm, $S=0,08$ m. (Ver tabla 7)

- Para la prueba no se contó con un instrumento para medición de la velocidad del agua, por lo que dicho valor se calculó con los datos encontrados experimentalmente en el Modelo A, y asumiendo una eficiencia de rotor del 95%, y con un diámetro de trabajo de $D_t=0,58$ m se calculo una velocidad del fluido de 0,607 m/s. (Ver tabla 3. Velocidad del agua en el canal)

Tabla 3. Velocidad del agua en el canal

Velocidad del agua en el canal		
Parámetro	Valor	Unidades
ne	19	[rpm]
h_r	95%	%
nt	20	[rpm]
w	2,094	[rad/s]
rt	0,290	[m]
v	0,607	[m/s]

Fuente. Elaboración propia.

- Los datos presentados anteriormente exigieron unos cambios drásticos en los parámetros iniciales del experimento, de acuerdo con los cuales variaría el análisis de los modelos teóricos de cada rotor ya que no se estarían utilizando bajo las condiciones para las cuales fueron diseñados. (Ver tabla 4)

Tabla 4. Parámetros experimentales Modelo A

Parámetros experimentales constantes		
G	9,8	[m/s ²]
D	0,660	[m]
Z	16	#
L	0,1	[m]
ρ	1000	[kg/m ³]
Parámetros experimentales variados		
V	0,607	[m/s]
H	0,019	[m]
D_w	0,580	[m]
P_e	1,82	[m]
η_r	95%	#
N	19,0	[rpm]
ω	1,99	[rad/s]
S	0,080	[m]
A	0,008	[m ²]
Q	0,005	[m ³ /s]
Pd	0,89	[W]
Peje	0,85	[W]
τ	0,5	[Nm]

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 5. Parámetros experimentales Modelo B

Parámetros experimentales Modelo B		
Parámetro	Valor	Unidades
D	0,12	[m]
A	0,011	[m ²]
θ	20	[grados]
v	0,607	[m/s]
ρ	1000	[kg/m ³]
P _d	1,265	[W]
η _r	95%	#
Peje	1,20	[W]

Fuente. Elaboración propia.

- Los torques mínimos de los rotores no estaban dentro del rango de medición del dinamómetro acoplado al torquímetro, por lo que no fue posible medirlo y se asumió como cero (Ver Tabla 6. Mediciones experimentales Modelo A y Tabla 7. Mediciones experimentales Modelo B)

1.1.10 Medición

Para las mediciones se analizaron diferentes escenarios en los que se estudiaba el comportamiento de cada rotor. Los escenarios iban desde que el rotor giraba libremente (escenario 1), con aumento progresivo de fuerza (escenario 2-9), hasta detener completamente el rotor (escenario 10).

El propósito de realizar dichos escenarios fue simular el efecto que el generador realiza sobre el rotor debido a la fuerza electromotriz ¹, de esta manera, en cada escenario, por medio del torquímetro, se aplicaba un contra torque al rotor que aumentaba progresivamente hasta detener el rotor, esto con el propósito de obtener los resultados de potencia para posibles torques que un posterior generador pudiera ejercer sobre el mismo y así verificar la mayor eficiencia del sistema.

Es valido aclarar, que experimentos de este tipo se pueden son frecuentes en el desarrollo de turbinas hidráulicas, tal como es expresado por el Ingeniero Oscar Raul

¹ La fuerza electromotriz (FEM) (Representado con el símbolo griego \mathcal{E}) es toda causa capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado. Es una característica de cada generador eléctrico. Se define como el trabajo que el generador realiza para pasar por su interior la unidad de carga positiva del polo negativo al positivo. (Fuerza electromotriz:Wikipedia)

Dolling en el proyecto titulado “Diseño de un modelo de una micro turbina hidráulica portátil” (Dolling & Donario, 2001)

1.1.11 Resultados

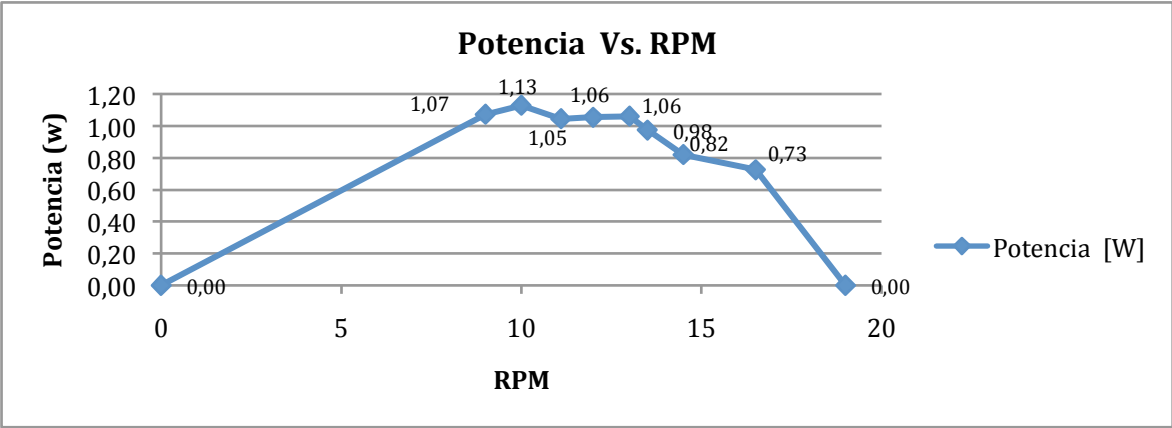
Se tomaron las siguientes medidas

Tabla 6. Mediciones experimentales Modelo A

Mediciones Modelo A											
Parámetro	Unidades	Datos									
velocidad	[m/s]	0,607									
Palanca torquimetro	[m]	0,3									
Radio externo	[m]	0,33									
Radio de trabajo	[m]	0,29									
Escenario	[#]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fuerza Torquimetro	[N]	0	1,40	1,80	2,30	2,60	2,80	3,00	3,60	3,80	4,20
Torque	[Nm]	0	0,42	0,54	0,69	0,78	0,84	0,90	1,08	1,14	1,26
Fuerza radio de trabajo	[N]	0	1,45	1,86	2,38	2,69	2,90	3,10	3,72	3,93	4,34
Fuerza tangente	[N]	0	1,27	1,64	2,09	2,36	2,55	2,73	3,27	3,45	3,82
N	[rpm]	20	17	15	14	13	12	11,1	10	9	0
ω	[rad/s]	2,09	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3	1,16	1,05	0,94	0
Potencia	[W]	0,00	0,73	0,82	0,98	1,06	1,06	1,05	1,13	1,07	0,00

Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 3. Curva Potencia Vs. RPM para Modelo A



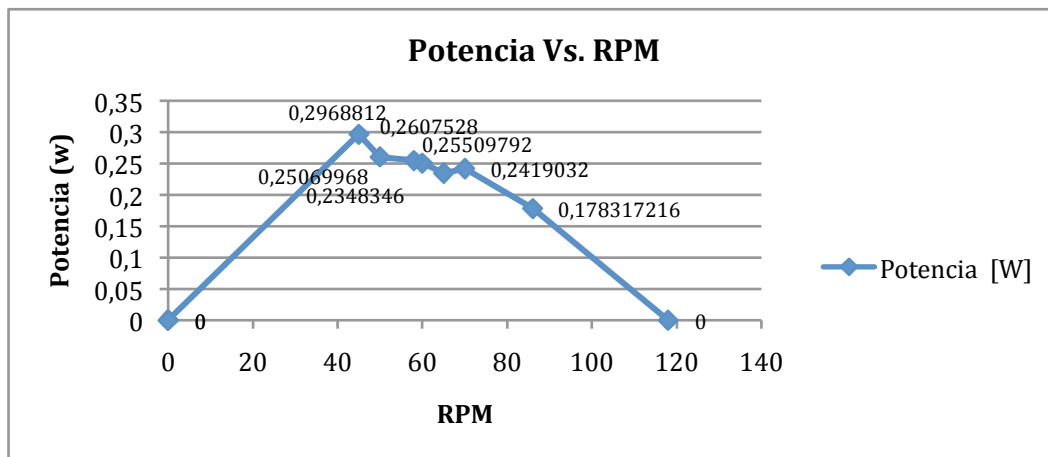
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 7. Mediciones experimentales Modelo B

Mediciones Modelo B											
Parámetro	Unidades	Datos									
velocidad	[m/s]	0,607									
Radio	[m]	0,06									
Palanca torquimetro	[m]	0,3									
Escenario	[#]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fuerza Torquimetro	[N]	0	0,066	0,11	0,12	0,133	0,14	0,166	0,21	0,33	0
Torque	[Nm]	0	0,02	0,033	0,035	0,040	0,042	0,05	0,06	0,1	0
Fuerza eje rotor	[N]	0	0,33	0,55	0,58	0,665	0,7	0,83	1,05	1,65	0
n	[rpm]	118	86	70	65	60	58	50	45	0	0
ω	[rad/s]	12,36	9,01	7,33	6,81	6,28	6,07	5,24	4,71	0,00	0,00
Potencia	[W]	0	0,178	0,242	0,23	0,251	0,255	0,261	0,3	0	0

Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 4. Curva Potencia Vs. RPM para Modelo B.



Fuente. Elaboración propia.

1.1.12 Análisis

Con el fin de cumplir el objetivo general de la prueba, en el proceso de selección del tipo del rotor, es valido aclarar que aunque el montaje experimental no propicio las condiciones ideales para las cuales se habían diseñado los modelos, fue posible compararlos bajo parámetros equivalentes de área de arrastre y velocidad.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que para un generador hidrocínético la potencia disponible en el fluido, se conoce como potencia hidráulica (P_h); Y la potencia

que se puede medir en el eje del rotor es la transformación de la energía cinética hidráulica en energía mecánica rotacional, de ahí que la potencia que se mide en el eje del rotor es la potencia mecánica (P_{eje}). Idealmente la relación entre ambos tipos de potencia esta determinada por un factor de eficiencia.

De esta manera se propuso validar los modelos teóricos planteando la siguiente hipótesis:

La potencia hallada en la ecuación $P_{eje} = \frac{1}{2} A \cdot V^3 \cdot \rho \cdot \eta$ (1), es equivalente a la potencia hallada en la ecuación $P_{eje} = W \cdot T$ (2).

Por esta razón el experimento consistió en hallar las mediciones para la ecuación (2), mientras que teóricamente se analizó la ecuación (1).

A partir de los resultados se concluyó que la hipótesis no se cumple para ambos modelos. En primer lugar, el modelo teórico no permite analizar los diferentes escenarios de fuerza, además se presenta una equivalencia entre los datos teóricos y los experimentales únicamente en el escenario 1 del Modelo A, en términos de velocidad angular (Ver Tabla 4. Parámetros experimentales Modelo A, y Tabla 6. Mediciones experimentales Modelo A); mientras que en términos de potencia sólo fue posible hallar el punto de potencia máximo, sin embargo en ambos modelos la potencia teórica es inferior a la experimental. En segundo lugar, los modelos no permiten hallar el valor de torque dinámico presente en los escenarios intermedios, por lo que no es posible calcular la ecuación (2) teóricamente. Por esta razón no es posible validar los modelos teóricos, los cuales requieren un mayor estudio de acuerdo al tipo de rotor que a seleccionar.

Por otro lado, los datos experimentales de ambos modelos presentan un grado de confiabilidad, por estar cercanos a los teóricos, y además por presentar un comportamiento coherente de la potencia con respecto a la velocidad angular (Ver ilustraciones 3 y 4).

De acuerdo con lo anterior, en ambos casos la potencia describe una parábola, en el cual para el escenario 1 se presenta la velocidad angular máxima, pero no existe

potencia por la ausencia de torque; dentro de los escenarios intermedios se encontró el punto de potencia máxima un rango entre 45% y 55% de las rpm máximas; finalmente, en el escenario 10 se presenta el mayor torque, equivalente al torque estático, punto en el cual no hay potencia por la ausencia de velocidad angular.

Finalmente, la coherencia de los datos experimentales, y el empleo adecuado de los instrumento de medición, permitieron identificar el Modelo A, como el tipo de rotor que mayor potencia entrega en comparación con el Modelo B, con un mismo área de arrastre.

1.1.13 Conclusiones

1.1.13.1 Instalación

- Se observó que la instalación del Modelo A es más sencilla que la del Modelo B, requiere menos elementos y menor precisión.
- El Modelo B es más sensible a cualquier elemento suspendido en el fluido dado que afecta de manera considerable su eficiencia.

1.1.13.2 Montaje

- Fue un montaje simple y se usaron instrumentos calibrados.
- Para la validación de los modelos teóricos es indispensable la utilización de un instrumento que mida la velocidad del fluido, ya que su ausencia en le presente montaje limita la comparación entre modelos teóricos y experimentales.
- Por tratarse del torquimetro, como un instrumento construida por el equipo de trabajo para el montaje experimental, puede ser calificado como posible causal de la diferencia entre los datos experimentales y teóricos, sin embargo gracias a dicho instrumento fue posible simular progresivamente el efecto del torque dinámico aplicado en el eje del rotor simulando adecuadamente la fuerza electromotriz del generador. Por esta razón cumplió satisfactoriamente con su objetivo de aumentar gradualmente el contra torque para analizar el comportamiento del sistema. Además permitió medir el torque estático, al prensar los discos, de manera que hiciera las veces de barra soldada al eje, y de esta forma eliminar cualquier movimiento relativo entre estas dos piezas y disminuir el error de cálculo en este punto.

1.1.13.3 Potencia

- Ambos modelos tienen gráficas similares, en las cuales se evidencia la mayor potencia cerca de la mitad de las rpm. Este resultado es similar al encontrado en el proyecto mencionado anteriormente
- En general, la potencia máxima encontrada según los resultados del experimento, es mayor que la hallada con los modelos teóricos, esta diferencia puede tener diferentes causas como:
 - ◆ En el experimento existen alteraciones del flujo que no se consideran en los modelos teóricos.
 - ◆ Para el caso del Modelo A, el área estimada en el modelo teórico solo considera el área correspondiente a una pala, sin embargo en el experimento se evidencia que en todo momento hay tres palas sumergidas, lo que indica que el área de contacto con el fluido es mayor.
 - ◆ Hallar la velocidad lineal por medio de los modelos teóricos puede tener algún error, y por esta razón es más confiable que esta sea hallada experimentalmente con un instrumento calibrado.
 - ◆ Hacen falta ecuaciones del modelo teórico que permitan hallar el torque dinámico para cada escenario, o para el escenario de mayor potencia.

1.1.13.4 Rotor

- Aunque los experimentos no permitan concluir con certeza en relación con los modelos teóricos, si fueron útiles para comparar las dos clases de rotores analizados, lo que permitió evidenciar datos mayores en términos de potencia mecánica experimental, para El Modelo A.

1.1.14 Conclusión general

- Los datos experimentales permiten identificar ventajas del Modelo A frente al Modelo B, en términos de torque y fuerza entregados en el eje, aunque en términos generales su rotación sea más lenta.

- En los principios de mecánica de fluidos se determinan modelos teóricos específicos dependiendo del tipo de turbomáquina, por lo que se concluye que una vez seleccionado el tipo de rotor, se debe definir el modelo técnico apropiado para este, dado que el actual no es concluyente.

Contribuyeron para finalmente decidir que el rotor tipo rueda hidráulica es el más adecuado para el proyecto, teniendo en cuenta aspectos como:

- ◆ La relación Potencia generada vs Tamaño.
- ◆ La facilidad de instalación.
- ◆ Menor complejidad en los modelos analíticos.
- ◆ Acceso a componentes.

1.2 MODELOS SIMPLES DE PRUEBA #2: PALAS DEL ROTOR DE ACCIÓN

Una vez más se utiliza el método experimental como apoyo para la generación de ideas diseño de detalle. En esta ocasión se quiso identificar la configuración de palas que entregue mayor fuerza estática.

Se construyó un modelo con una sola pala en un extremo, y con tres palas en el extremo opuesto, que permitiera comparar dos situaciones diferentes de manera experimental.

1.2.1 Objetivo general

Identificar la composición de palas más eficiente en términos de fuerza y torque, mediante la comparación de dos escenarios.

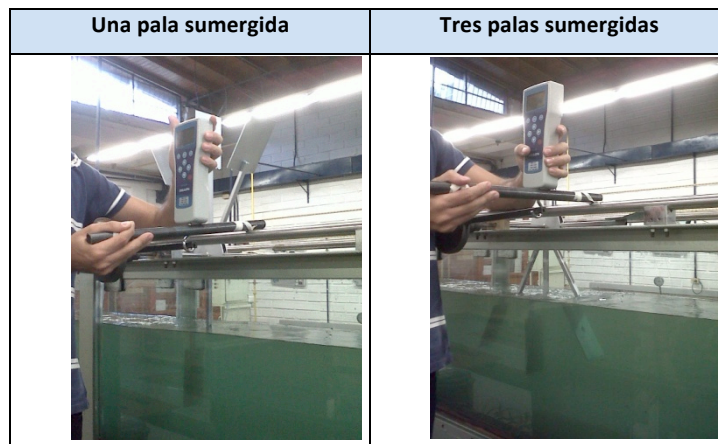
1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar la fuerza resultante para dos situaciones, tales como: una sola pala sumergida y tres palas sumergidas.
- Verificar si la velocidad del fluido se afecta de manera tan significativa, a medida que hallan más palas en contacto con el agua, como para influir en la fuerza resultante de la rueda hidráulica.

1.2.3 Descripción

Se construyó un rotor de acuerdo con el análisis dimensional, y basados en la ideas generadas en la sesiones de grupo # 3 y 4, para realizar un experimento estático (en el cual el rotor estaba totalmente detenido). (Ver ilustración 5) para compara diferentes escenarios y así determinar cual entrega mayor fuerza, al sumergir las tres, dos o una sola pala de la rueda hidráulica. (Ver Ilustración5)

Ilustración 5. Escenarios.



Fuente. Elaboración propia.

1.2.4 Variables y constantes

- Forma de la pala - constante
- Área de barrido (m^2) - constante
- Velocidad del fluido (m/s)- constante
- Carga en el eje (Fuerza, N)- constante

1.2.5 Base de comparación

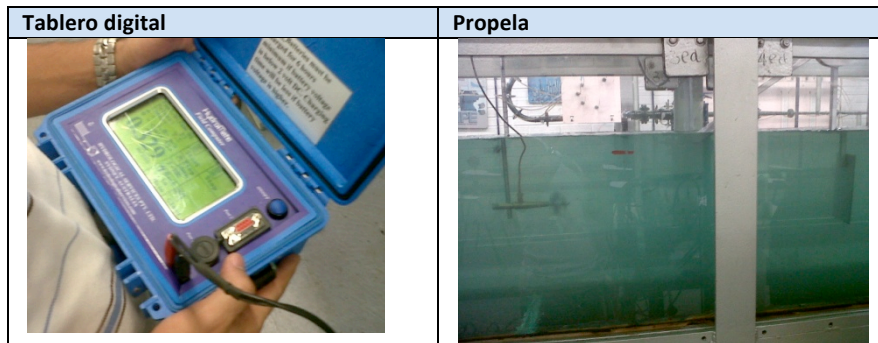
- Torque situación 1 (Nm) vs Torque situación 2 (Nm)
- Fuerza Pala situación 1 (N) vs Fuerza Pala situación 2 (N)

1.2.6 Equipos e Instrumentos

Para las pruebas experimentales se usaron los mismos instrumentos que se utilizaron en el primer montaje experimental.

Además se utilizó el caudalímetro del laboratorio de hidráulica de la Universidad Eafit para realizar la medición de la velocidad del fluido.

Ilustración 6. Caudalímetro



Fuente. Elaboración propia.

1.2.7 Pasos

1. Ubicar el rotor en el canal de hidráulica.
2. Encender el canal hasta alcanzar la velocidad de fluido máxima a una altura de 36 cm.
3. Medir la velocidad del fluido antes de la pala.
4. Medir la velocidad del fluido después de la pala.
5. Aplicar fuerza en el eje del rotor (utilizando el torquímetro), hasta detenerlo.
6. Medir torque estático.
7. Repetir el anterior procedimiento para el segundo escenario.

1.2.8 Montaje

Ilustración 7. Localización de la rueda en el canal.



Fuente. Elaboración propia.

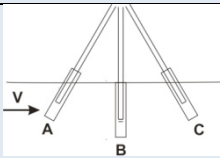
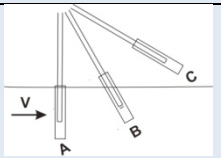
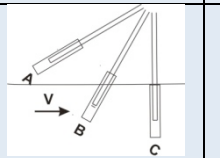
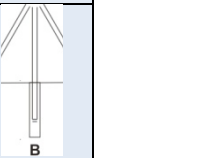
1.2.9 Resultados

Tabla 8. Condiciones del canal

Condiciones del canal		
Área	30 cm x 36 cm	0,108 m ²
Caudal	27,43	L/s
Velocidad de entrada	0,526	m/s
Velocidad de salida	0,503	m/s

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 9. Resultados para las diferentes escenarios de palas sumergidas

# palas sumergidas	3 ABC		2 A B		2 B C		1 B	
Escenario	1		2		3		4	
Imagen								
Fuerza Dinamómetro(N)	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max
	2,4	3	2,4	2,6	0,8	1,4	1,4	1,6
Torque Torquímetro	0,72	0,9	0,72	0,78	0,24	0,42	0,42	0,48
Fuerza Pala (N)	2,22	2,77	2,22	2,40	0,74	1,29	1,29	1,48

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 10. Análisis teórico de escenario 1

Análisis teórico de escenario 1		
Parámetro	Valor	Unidades
L	0,1	[m]
S	0,1	[m]
A	0,01	[m ²]
V	0,526	[m/s]
ρ	1000	[kg/m ³]
F	1,4	[N]

Fuente. Elaboración propia

1.2.10 Análisis de resultados y conclusiones

- En los resultados se observa que la fuerza de una sola pala es menor a la fuerza que tienen las tres palas sumergidas, y por consiguiente el torque en este último caso es mayor.
- La velocidad del fluido disminuye a medida que fluye a través de las palas, sin embargo los datos indican que la pérdida de dicha velocidad no es tan representativa, como para hacer que en el escenario de una sola pala se entregue más fuerza que en el escenario de tres palas, por lo que se concluye que a pesar de la variación en la velocidad de entrada en cada pala, el escenario 1 es el mejor en términos de fuerza.
- Para una mayor área de contacto con el agua se obtiene un mayor potencia, esto aplica para la sumatoria de palas sumergidas en el fluido.
- Estáticamente se concluye que para se presenta una fuerza mayor y por lo tanto mayor torque y potencia en el escenario 1, cuando las tres palas están sumergidas. Por esta razón, aunque el experimento es concluyente carece del punto de vista dinámico de este fenómeno.
- Con base en la ecuación de fuerza, es posible validar lo datos teóricos con los experimentales en el escenario 4, sin embargo dicha ecuación no aplica para los demás escenario ya que en éstos se consideran variables dinámicas que complejizan el estudio de dicho fenómeno para dos y tres palas.

1.3 MODELOS DE PRUEBA #3 : PRUEBA DE CAMPO #1

Se construyó un modelo 1:1 de la rueda hidráulica con el diseño final de las palas, para ser analizado de manera experimental en el posible contexto de uso. Con el objetivo principal de verificar su potencia mecánica.

1.3.1 Objetivo general

Verificar la potencia mecánica de la rueda hidráulica, mediante el desarrollo de un experimento en el contexto de uso.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar el torque máximo de la rueda, mediante la construcción de una grafica Torque (NM) vs RPM.
- Identificar la potencia máxima de la rueda, mediante la construcción de una grafica Potencia (W) vs RPM.
- Validar el modelo teórico mediante la comparación de los resultados experimentales con los teóricos.

1.3.3 Descripción

La prueba se realizó el día Viernes 7 de Mayo y tuvo lugar en la quebrada La Miel en el Municipio de Caldas.

1.3.4 Variables y constantes

- Forma de la pala - constante
- Área de barrido (m^2) - constante
- Velocidad del fluido (m/s)- variable
- Carga en el eje (Fuerza, N)- variable

1.3.5 Base de comparación

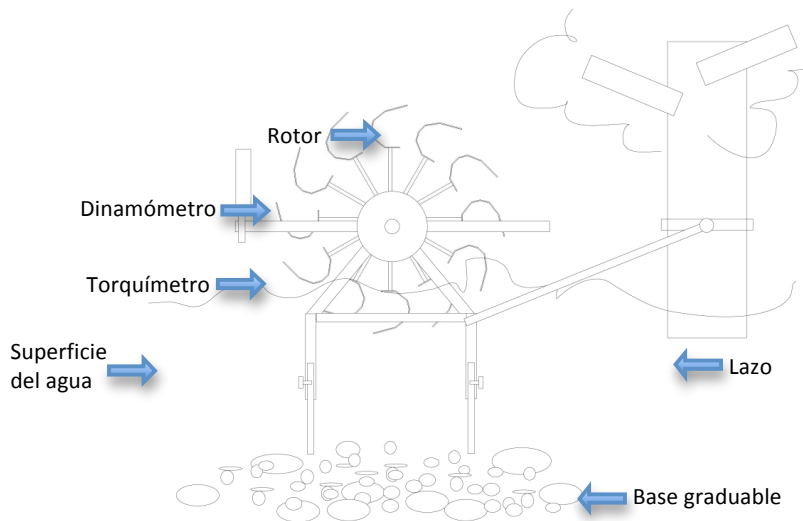
- Torque (Nm) vs velocidad angular (rpm).
- Potencia (vatios) vs velocidad angular (rpm).

1.3.6 Equipos e instrumentos requeridos

- Torquímetro
- Dinamómetro
- Cronómetro
- Flexómetro
- Objeto flotante (botella)

En la ilustración 8 se muestra la secuencia de pasos para el montaje.

Ilustración 8 . Montaje del rotor en el río.



Fuente. Elaboración propia.

1.3.7 Montaje

1.3.7.1 Adecuar los instrumentos.

- Cada miembro del equipo de trabajo se encargó del manejo de un instrumento para toda la prueba.
- El torquímetro se ensambló en el eje.

1.3.7.2 Medición de velocidad del río.

- Se definió un punto fijo (eje de la rueda) y luego se midieron seis metros aguas arriba de este.
- Desde dicho punto se lanzó un objeto flotante (botella) y se cronometró el tiempo que tardaba en llegar al eje de la rueda.
- Se repitió el procedimiento ocho veces, para calcular la velocidad promedio del río.

1.3.7.3 Posicionamiento de la rueda.

- Se instaló la rueda en el soporte y este se graduó a una altura tal que la rueda solo estuviera sumergida 16 cm en el agua.
- Se ubicó la rueda en el río.

1.3.8 Pasos

1. Ubicar la rueda en el río según el montaje.(ver ilustración 8).

2. Medir la velocidad del río.
3. Medir las revoluciones por minuto del rotor libre.
4. Aplicar fuerza en el eje del rotor (utilizando el torquímetro), aumentando progresivamente la carga hasta detenerlo.
5. Medir revoluciones por minuto para cada escenario de fuerza.
6. Medir torque estático.

1.3.9 Resultados

Para hallar la velocidad del río se utilizó la siguiente tabla.

Tabla 11. Medición de la velocidad de río con objeto flotante.

Velocidad del río	1,4510	m/s
Tiempo	Distancia	
4,25	6 m	
4,4		
3,87		
4,94		
3,87		
3,83		
3,58		
4,135	s	

Fuente. Elaboración propia.

En la tabla 12 se muestran los valores obtenidos en la prueba.

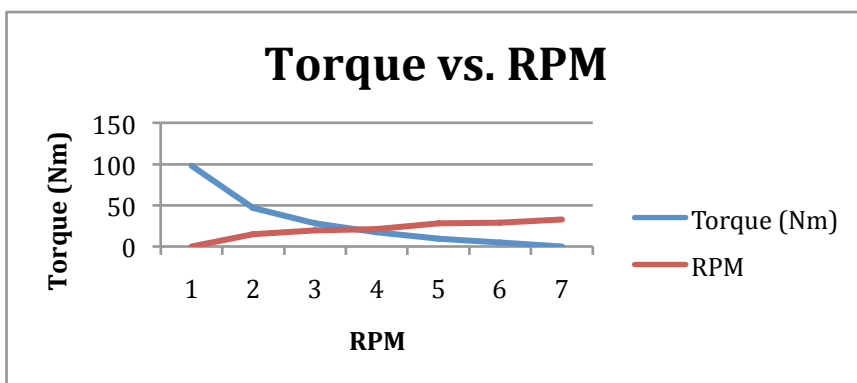
Tabla 12. Mediciones experimentales del rotor.

Fuerza (kg)	Fuerza (N)	Torque (Nm)	Fuerza (N) (en la pala)	RPM	w (rad/s)	Potencia (W)
10	98	98	245	0	0	0
15,8	154,84	46,452	116,13	15	1,5708	73,0
9,5	93,1	27,93	69,825	19,5	2,04204	57,0
6	58,8	17,64	44,1	21,5	2,25148	39,7
3,3	32,34	9,702	24,255	28	2,93216	28,4

1,7	16,66	4,998	12,495	29	3,03688	15,2
0	0	0	0	33	3,45576	0,0

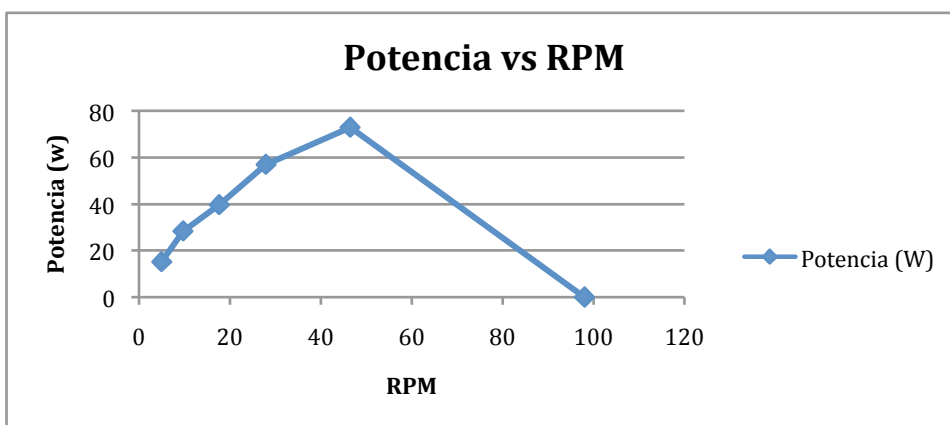
Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 9. Curva Torque vs. RPM.



Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 10. Curva Potencia vs. RPM.



Fuente. Elaboración propia.

- Los datos se empezaron a obtener partiendo de la rueda libre, y aplicándole una fuerza al eje (usando el torquimetro) gradualmente mayor, como se observa en la tabla 12. Sin embargo durante el experimento, la fuerza de la rueda supero la fuerza del torquimetro, cuando la rueda había alcanzado a bajar la velocidad hasta 15 RPM y no fue posible obtener la totalidad de los

datos, por consiguiente no se determinó el comportamiento exacto de las revoluciones, al aumentar la fuerza desde dicho punto gradualmente hasta detener la rueda.

- En la ilustración 10 se muestra un comportamiento aproximado de la potencia dado que el dato de torque estático se alcanzo a obtener sin necesidad de usar el torquímetro, en este caso se bloqueo la rueda con una barra y se obtuvo el valor de fuerza en ese punto.

1.3.10 Conclusiones

- La poca profundidad de la quebrada (25 cm) y la existencia de rocas en su recorrido puede haber afectado la incidencia del agua en las palas del rotor y por consiguiente haber disminuido su eficiencia de manera significativa.
- Para minimizar perdidas de eficiencia en la rueda y obtener datos que sean mas reales, es necesario realizar la prueba en un río con una mayor profundidad.
- Dado que la fuerza que se requiere para detener la rueda es mayor a la esperada, el torquímetro debe ser reforzado con un resorte mas fuerte, que permita aplicar dicha fuerza hasta detener la rueda.
- Todavía no es posible validar el modelo teórico, dado que el ultimo dato obtenido fue cerca de la mitad de las RPMS donde se espera tener la mayor potencia teórica, y sin los datos experimentales siguientes no se podría decir si esta va a aumentar o a disminuir, como para determinar si es máxima o no.
- Es necesario realizar otra prueba donde se obtengan la totalidad de los datos, para poder determinar la potencia máxima de la rueda y a que RPM se obtiene dicha potencia.

1.4 MODELOS DE PRUEBA #4 : PRUEBA DE CAMPO #2

Se realizó una segunda prueba con el modelo funcional construido anteriormente, en un río con condiciones de profundidad similares a las del contexto de uso. Con el objetivo de verificar su potencia mecánica y compararla con la teórica.

1.4.1 Descripción

La prueba se realizó el día Viernes 27 de Mayo y tuvo lugar en el río Buey en el Municipio de Santa Bárbara.

1.4.2 Objetivo general

Verificar la potencia mecánica de la rueda hidráulica, mediante el desarrollo de un experimento en un río con condiciones de profundidad similares a las del contexto de uso.

1.4.3 Objetivos específicos

- Identificar el torque máximo de la rueda, mediante la construcción de una grafica Torque (NM) vs RPM.
- Identificar la potencia máxima de la rueda, mediante la construcción de una grafica Potencia (W) vs RPM.
- Validar el modelo teórico mediante la comparación de los resultados experimentales con los teóricos.

1.4.4 Variables y constantes

- Forma de la pala - constante
- Área de barrido (m^2) - constante
- Velocidad del fluido (m/s)- variable
- Carga en el eje (Fuerza, N)- variable

1.4.5 Base de comparación

- Torque (Nm) vs velocidad angular (rpm).
- Potencia (vatios) vs velocidad angular (rpm).

1.4.6 Equipos e instrumentos requeridos

- Torquímetro
- Dinamómetro
- Cronometro
- Flexometro
- Objeto flotante (botella)

1.4.7 Pasos

1. Ubicar la rueda en el río según el montaje.(ver ilustracion8).
2. Medir la velocidad del río.
3. Medir las revoluciones por minuto del rotor libre.
4. Aplicar fuerza en el eje del rotor (utilizando el torquímetro), aumentando progresivamente la carga hasta detenerlo.
5. Medir revoluciones por minuto para cada escenario de fuerza.
6. Medir torque estático.

En la ilustración 8 se muestra la disposición de los componentes según el montaje.(ver ilustracion8).

1.4.8 Montaje

1.4.8.1 Adecuar los instrumentos.

- Cada miembro del equipo de trabajo se encargo del manejo de un instrumento para toda la prueba.
- El torquímetro se ensambla en el eje.

1.4.8.2 Medición de velocidad del río.

- Se definió un punto fijo (eje de la rueda) y luego se midieron 6,5 metros aguas arriba de este.
- Desde dicho punto se lanzó un objeto flotante (botella) y se cronometro el tiempo que tardaba en llegar al eje de la rueda.
- Se repitió el procedimiento ocho veces, para calcular la velocidad promedio del rio.

1.4.8.3 Posicionamiento de la rueda.

- Se instalo la rueda en el soporte y este se graduó a una altura tal que la rueda solo estuviera sumergida 16 cm en el agua.
- Se ató una cuerda de dos arboles en las dos orillas del río atravesándolo.
- Se ubicó la rueda en el rio.
- Se amarró la rueda de la cuerda para asegurarla.

1.4.9 Resultados

Para hallar la velocidad del río se utilizó la siguiente tabla.

Tabla 13. Calculo e la velocidad del río con objeto flotante.

Tiempo (s)		
3,97		
4,4		
5,17		
4,46		
4,71		
4,72		
4,6		
5,26		
4,88		
4,7	Promedio	
Distancia	6,5	m
Velocidad del río	1,3872	m/s

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 14. Velocida del río calculada a partir de la rpm.

Dato experimental	Unidades
42	rpm
1,759296	m/s

Fuente. Elaboración propia.

En la tabla 15 se muestran los valores obtenidos en la prueba.

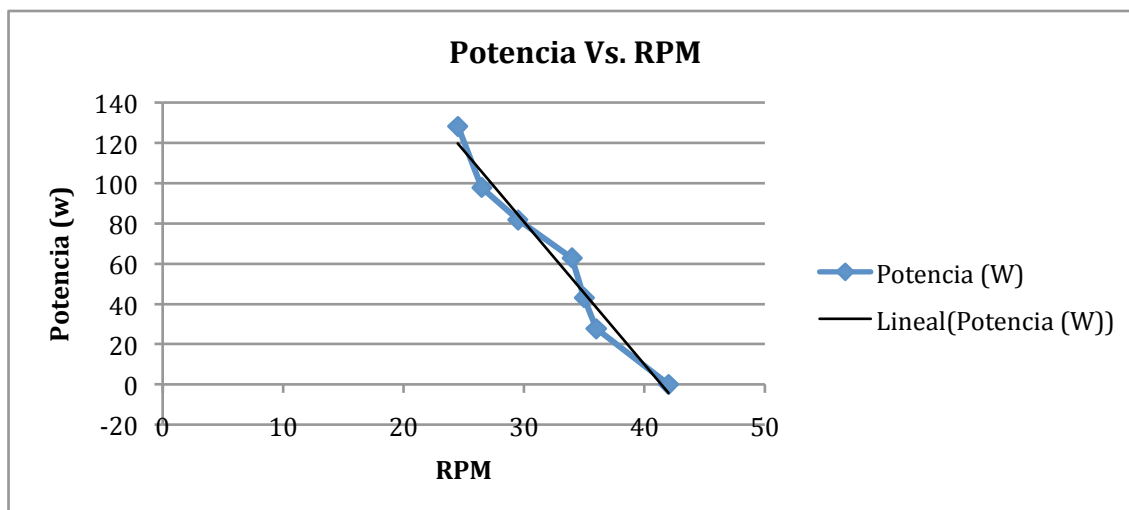
Tabla 15. Mediciones experimentales.

Fuerza (kg)	Fuerza (N)	Torque (Nm)	Fuerza (N)	RPM	w (rad/s)	Potencia (W)
0	0	0	0	42	4,39824	0
2,5	24,5	7,35	18,375	36	3,76992	27,709
4	39,2	11,76	29,4	35	3,6652	43,10
6	58,8	17,64	44,1	34	3,56048	62,81
9	88,2	26,46	66,15	29,5	3,08924	81,74

12	117,6	35,28	88,2	26,5	2,77508	97,90
17	166,6	49,98	124,95	24,5	2,56564	128,23

Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 11. Curva Potencia vs. RPM.



Fuente. Elaboración propia.

- En esta prueba solo se alcanzaron a obtener los datos hasta un 40% de la rpms, dado que la fuerza de la rueda superó de nuevo la fuerza que podía ejercer el torquímetro hasta partir el eje.
- Para esta prueba se calculó la velocidad del río de dos formas de manera que se pudiera comparar y validar un dato. En primer lugar se halló la velocidad con el objeto flotante y se hizo un promedio de los diferentes valores obtenidos, como se observa en la tabla 13. En segundo lugar, se halló la velocidad de manera teórica partiendo de las rpms de la rueda girando libremente, como se observa en la tabla 14.
- El calculo de la velocidad del río hallada con el objeto flotante arroja un dato diferente a la velocidad hallada a partir de las rpms.

1.4.10 Conclusiones

- Es necesaria la construcción de un nuevo torquímetro más robusto, que permita la medición del torque de la rueda hasta detenerla.
- La diferencia en los resultados de velocidad halladas con los dos métodos diferentes, puede ser causada por el valor del radio de la rueda que se asuma,

en la literatura no se halló que valor de radio se debe tomar para hallar la velocidad teóricamente, este radio puede ser el externo o el medio de la rueda.

- Se debe validar este radio a asumir, realizando el calculo teórico de potencia, (en el cual se usa este radio) y comparándolo con el experimental.
- La medición de la velocidad del río se debe hacer con un instrumento como un corrientímetro, que permita minimizar los errores experimentales.
- Las nuevas condiciones del río permitieron un mejor desempeño de la rueda comparándolo con la anterior prueba. Se obtiene una mayor potencia a una mayor profundidad de río.
- Se deben considerar medidas de precaución para hacer la prueba, dado que se observó que la rueda tiene una fuerza considerable.
- Es necesario realizar una tercera prueba de campo, donde se cuente con instrumentos más precisos para hacer las mediciones.

1.5 MODELOS DE PRUEBA #5: PRUEBA DE CAMPO #3

Dado que en la prueba numero cuatro, no fue posible alcanzar todos los objetivos propuestos, se realizo una tercera prueba con el modelo funcional del rotor, en condiciones similares a la anterior prueba de campo.

1.5.1 Objetivo general

Verificar la potencia mecánica de la rueda hidráulica, mediante el desarrollo de un experimento en un río con condiciones de profundidad similares a las del contexto de uso.

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar el torque máximo de la rueda, mediante la construcción de una grafica Torque (NM) vs RPM.
- Identificar la potencia máxima de la rueda, mediante la construcción de una grafica Potencia (W) vs RPM.
- Validar el modelo teórico mediante la comparación de los resultados experimentales con los teóricos.

- Verificar con diferentes instrumentos de medición, la velocidad del río, para obtener mayor certeza en los cálculos.

1.5.3 Base de comparación

- Torque (Nm) vs velocidad angular (rpm).
- Potencia (vatios) vs velocidad angular (rpm).

1.5.4 Equipos e instrumentos requeridos

- Torquímetro
- Dinamómetro
- Cronometro
- Flexometro
- Corrientimetro
- Rueda hidráulica (usada en la modelos de prueba simple #1)

1.5.5 Pasos

7. Ubicar la rueda en el río según el montaje.(ver ilustracion8).
8. Medir la velocidad del río.
9. Medir las revoluciones por minuto del rotor libre.
10. Aplicar fuerza en el eje del rotor (utilizando el torquímetro), aumentando progresivamente la carga hasta detenerlo.
11. Medir revoluciones por minuto para cada escenario de fuerza.
12. Medir torque estático.

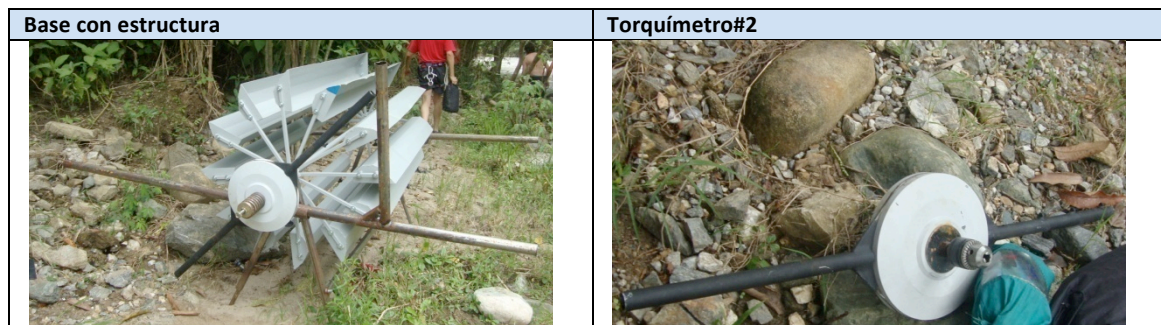
1.5.6 Descripción

Esta prueba se realizó el jueves 19 de Agosto 2010 y tuvo lugar en el río Buey en el Municipio de Santa Bárbara.

Para esta prueba se construyó un torquímetro con mejores condiciones que el usado en la prueba anterior, con la capacidad de soportar más torque.

Además se añadió a la base de la rueda una estructura que permitiera una manipulación más sencilla de la misma fuera y dentro del río.

Ilustración 12. Base modificada y torquimetro #2.



Fuente. Elaboración propia.

1.5.7 Montaje

1.5.7.1 Adecuar los instrumentos.

- Se solicitó la ayuda de un técnico de la Universidad Eafit, para la manipulación del Corrientímetro digital.
- Se realizaron unas pruebas de laboratorio previas en las que se compararon instrumentos para la medición de la velocidad del canal y así calibrar la medida entregada por el Corrientímetro digital.
- Cada miembro del equipo de trabajo se encargó del manejo de un instrumento para toda la prueba.
- El torquímetro se ensambló en el eje.

1.5.7.2 Medición de velocidad del río.

- Se realizaron mediciones con el caudalímetro ubicado a una altura igual al punto medio de la pala y a 20 cm aguas arriba del rotor. Se tomaron diferentes medidas haciendo una malla a lo largo del ancho del rotor.
- Se realizó un segundo calculo de la velocidad, usando las rpm del rotor y calculando de forma analítica la correspondiente velocidad de giro.
- Un tercer calculo se hizo de manera similar al anterior, pero usando las rpm de una rueda mas pequeña de palas planas (60 cm de diámetro x 10 cm ancho y profundidad de las palas de 15 cm).

1.5.7.3 Posicionamiento de la rueda.

- Se instalo la rueda en el soporte y este se graduó a una altura tal que la rueda solo estuviera sumergida 16 cm en el agua.

- Se ató una cuerda de dos árboles en las dos orillas del río atravesándolo.
- Se ubicó la rueda en el río.
- Se amarró la rueda de la cuerda, para asegurarla.

Ilustración 10. Montaje de la prueba.



Fuente. Elaboración propia.

Resultados

Para hallar la velocidad del río se utilizó la siguiente tabla.

Tabla 16. Calculo de la velocidad del río a partir de las rpm del rotor.

Velocidad del agua medida con rotor de modelo funcional		
Parámetro	Valor	Unidades
ne	44	[rpm]

h_r	96%	%
n_t	45,83	[rpm]
w	4,800	[rad/s]
r_t	0,310	[m]
v	1,488	[m/s]

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 17. Cálculo de la velocidad del río a partir de las rpm de la rueda pequeña de palas planas.

Velocidad del agua medida con rotor de modelo simple		
Parámetro	Valor	Unidades
n_e	42	[rpm]
h_r	96%	%
n_t	43,75	[rpm]
w	4,582	[rad/s]
r_t	0,230	[m]
v	1,054	[m/s]

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 18. Velocidad del río medida con el corrientímetro .

Velocidad del agua medida corrientímetro		
Dato	0,9911	[m/s]
	1,012	[m/s]
	0,986	[m/s]
	1,101	[m/s]
Promedio	1,0225	[m/s]

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 19. Datos generales para los cálculos de potencia.

Radio torquímetro	0,5	m
Radio centro de masa pala	0,31	m
Radio externo rotor	0,4	m

Fuente. Elaboración propia.

En la tabla 20 se muestran los valores obtenidos en la prueba.

Tabla 20. Mediciones experimentales.

Medición	Fuerza (kg)	Fuerza (N)	Torque (Nm)	Fuerza (N)	RPM	w (rad/s)	Potencia (W)
1	0	0	0	0	44	4,60768	0
2	2,5	24,5	12,25	39,52	40	4,1888	51,31
3	4	39,2	19,6	63,23	36	3,76992	73,89
4	6	58,8	29,4	94,84	33	3,45576	101,60
5	10	98	49	158,06	26	2,72272	133,41
6	12	117,6	58,8	189,68	25	2,618	153,94
7	15	147	73,5	237,10	22,5	2,3562	173,18
8	17	166,6	83,3	268,71	22	2,30384	191,91
9	19	186,2	93,1	300,32	19	1,98968	185,24
10	21	205,8	102,9	331,94	16	1,67552	172,41
11	25	245	122,5	395,16	12	1,25664	153,94
12	28	274,4	137,2	442,58	0	0	0,00

Fuente. Elaboración propia.

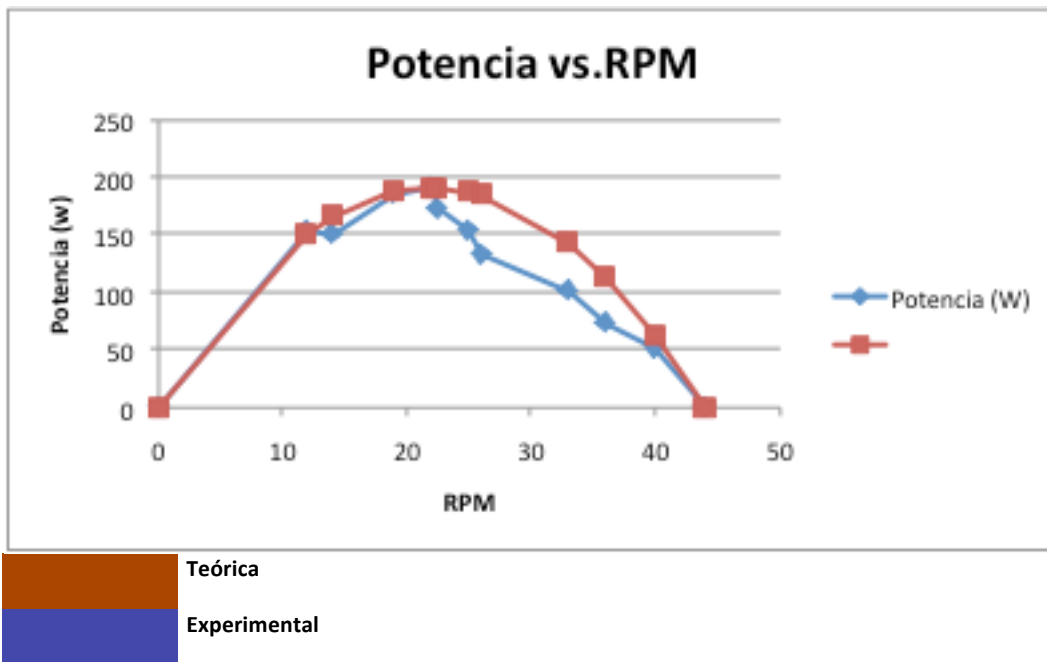
Tabla 21. Cálculo de la potencia teórica.

Potencia teórica		
Opción	1	2
c_1	1,023	1,488
g	9,8	9,8
H	0,053345	0,112951
L	1,22	1,22
S	0,16	0,16
A	0,1952	0,1952
Q	0,1996	0,2904
r	1000	1000
g	9800	9800
h_T	95%	60%
Ph	104,3450	321,49
P e	99,13	192,89

Fuente. Elaboración propia.

En esta prueba se realizaron las mediciones necesarias para construir la curva de potencia vs. Rpm del rotor, con mayor certeza que en las pruebas anteriores. A continuación se presenta una ilustración donde se visualiza la curva de potencia teórica vs. La obtenida con el rotor en el río.

Ilustración 11. Comparación de curva Potencia Vs. RPM experimental y teórica.



Fuente. Elaboración propia.

1.5.8 Conclusiones

- La potencia máxima del rotor es de 192 w a 22 rpm. Y en este punto el rotor ejerce un torque de 83,3 Nm.
- El modelo teórico se puede comprobar y verificar con el modelo experimental, el cual arroja unos resultados muy similares, si se considera en el modelo teórico una eficiencia del 60%.
- La potencia teórica en comparación con la obtenida experimentalmente tienen la misma tendencia de campana, sin embargo la real está por debajo de la teórica, como se esperaba.
- Las rpm obtenidas para la mayor potencia, deben ser multiplicadas, dado que no fue posible la consecución en el mercado local, de un generador de acople directo de estas condiciones

- La potencia obtenida es muy baja en relación con la que se esperaba contar para producir energía eléctrica. Si se tiene en cuenta que esta va a seguir disminuyendo con el acople de la transmisión y del generador, así como el cableado y las baterías, se podría decir que no es suficiente para entregar la energía eléctrica que supla las necesidades básicas del usuario planteadas.
- Las velocidades del río calculadas mediante el uso del modelo simple y el Corrientímetro arrojaron resultados muy similares, pero que al hacer un análisis de la situación, se consideraron no tan acertados, dado que son mediciones muy puntuales en un río con una corriente considerable donde existen corrientes que se observó afectaban de forma significativa estos equipos de medición.

Es por esto que el dato que se considero más pertinente para la velocidad del río, fue el que se calculó usando las rpm del rotor.

Esto también dado que la potencia a la velocidad mas baja (corrientimetro-modelo simple), es mucho mas baja que la hallada experimentalmente, y esto en la realidad no tendría sentido dado que existen factores que afectan el sistema en el río y lo hacen ser menos eficiente.

1.6 MODELOS DE PRUEBA #5: PRUEBA DE POTENCIA ELÉCTRICA

Se realizó una prueba el laboratorio de mecatronica de la Universidad Eafit, con el fin de verificar la potencia eléctrica que entrega el sistema, simulando las condiciones de velocidad y torque proporcionadas por el río.

1.6.1 Objetivo general

Verificar la potencia eléctrica de la rueda hidráulica, mediante el desarrollo de un experimento en un laboratorio, simulando las condiciones de velocidad angular y torque obtenidas en las pruebas de campo.

1.6.2 Objetivos específicos

- Identificar el la potencia eléctrica en W entregada por el rotor, girando en un rango entre 20-27 rpm.

- Identificar y comparar la potencia de entrada (proporcionada por el motor) y de salida en el rotor, para determinar la eficiencia del sistema.
- Verificar el desempeño de la transmisión y de la estructura, durante el desarrollo de la prueba.
- Corroborar si el sistema es capaz de cargar la batería.

1.6.3 Base de comparación

- Potencia (vatios) vs velocidad angular (rpm).
- Potencia de entrada (vatios) vs Potencia de salida.

1.6.4 Equipos e instrumentos requeridos

- Tacómetro
- Amperímetro
- Voltímetro
- Batería de carro (30 A)
- Resistencia eléctrica
- Motor AC, 1hp
- Reductor 1:40
- Variador de velocidad

1.6.5 Pasos

1. Acoplar el motor al eje del rotor.
2. Conectar el variador de velocidad al motor.
3. Medir voltaje en la batería en vacío.
4. Conectar la batería al generador.
5. Conectar la resistencia a tierra (chasis del sistema).
6. Configurar el variador de velocidad, modificando la corriente de entrada del motor a 6,1 A.
7. Encender el variador de velocidad
8. Verificar amperaje del motor
9. Medir revoluciones por minuto del rotor
10. Medir amperaje en la salida del generador
11. Medir voltaje en la batería (conectada)

1.6.6 Descripción

Esta prueba se realizó el martes 5 de Octubre de 2010 y tuvo lugar en el laboratorio de mecatronica de la Universidad Eafit.



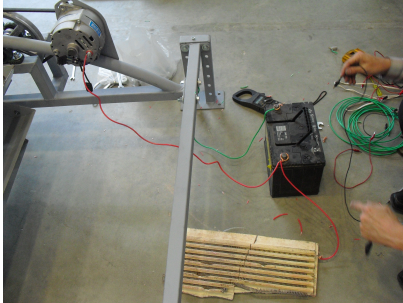
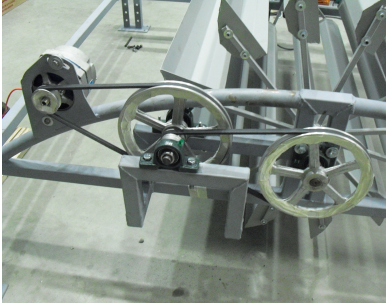
Con el objetivo de simular las condiciones de velocidad y torque que se obtuvieron en las pruebas de campo, fue necesario adaptar al eje del rotor, un motor AC de 1 Hp acoplado a un reductor 1:40 y variar su velocidad hasta 6,1 A modificando la corriente de entrada.

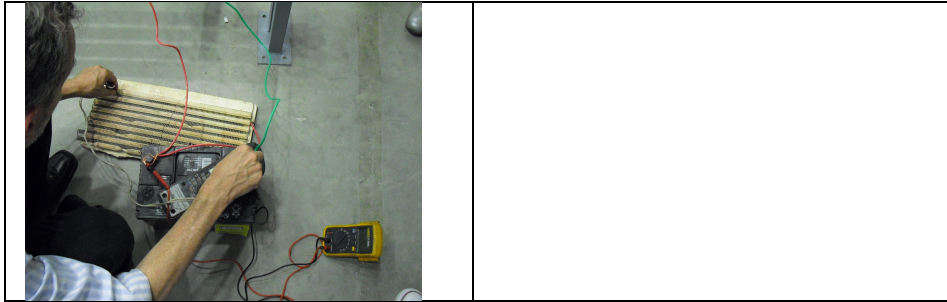
De esta forma fue posible medir la potencia que dicho motor le entrega al rotor hasta hacerlo girar entre 20- 70 rpms, y al mismo tiempo medir la potencia eléctrica que entrega el generador en estas condiciones.

Para verificar si la potencia entregada por el generador era útil, se realizó el montaje con la resistencia eléctrica, de manera que ésta simulara la demanda de energía a la batería, y se comprobó que el voltaje de la batería conectada no fuera inferior al voltaje de esta en vacío

1.6.7 Montaje

Ilustración 11. Montaje de la prueba.

1. Acoplar el motor al rotor 	2. Configurar y conectar el variador 
3. Conectar la resistencia a la batería Conectar la batería al generador 	4. Medir RPM del rotor 
5. Simular carga eléctrica con la resistencia para: Medir Amperaje- salida del rotor Medir voltaje en la batería	



Fuente. Elaboración propia.

1.6.8 Resultados

En la siguiente tabla se encuentran las características del motor y del reductor que garantizaron la operación del sistema simulando las condiciones obtenidas en el río.

Tabla 22. Parámetros iniciales del motor y reductor.

Motor		
Parámetro	Valor	Unidades
Voltaje	208	V
Amperaje	0,6	A
Potencia	216,16	W
Revoluciones	1000	rpm

Reductor		
Parámetro	Valor	Unidades
Relación	1	40
Rev. entrada	1000	rpm
Rev. salida	25	rpm
Eficiencia	90%	
Potencia de salida	194,5	W

Fuente. Elaboración propia.

Para verificar la eficiencia de la transmisión se realizaron mediciones de las rpm de cada patea en dos escenarios, la primera se realizó sin la carga eléctrica ejercida por la resistencia en la batería (sin consumo eléctrico), y la segunda medición se realizó

demandando una carga eléctrica de 14,8 A, carga máxima que se puede demandar del sistema sin que el voltaje de la batería sea menor a 12V.

Como se ilustra en la tabla a continuación, las rpm finales en la polea 2 de la medición 2, son menores a las obtenidas en la medición 1, esto comprueba la carga contraelectromotriz que el generador tiene sobre la transmisión y que pudo provocar deslizamientos en las poleas disminuyendo su eficiencia.

Tabla 23.Mediciones de la transmision.

Transmisión						
	Valor teórico		Medición 1		Medición 2	
Parámetro	Valor	Unidades	Valor	Unidades	Valor	Unidades
Polea 1	25	rpm	26	rpm	25,7	rpm
Relación 1	5	[1:5]	5		2,72	
Contra eje	125	rpm	130	rpm	70	rpm
Relación 2	5	[1:5]	4,15		4,29	
Polea 2	625		540	rpm	300	rpm
Eficiencia					0,48	

Fuente. Elaboración propia.

En las condiciones de operación que se plantean en la tabla 22, y demandando la carga eléctrica de 14,8 A, se obtuvieron los siguientes datos para el rotor y el generador.

Tabla 24.Mediciones del rotor en operación.

Rotor		
Parámetro	Valor	Unidades
Potencia de entrada	194,54	W
Revoluciones	25,7	rpm
Vel. Angular	2,69	rad/s
Torque	72,29	Nm

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 25. Mediciones del generador en operación.

Generador		
Parámetro	Valor	Unidades
Revoluciones	300	rpm
Velocidad angular	31,42	rad/s
Voltaje	12,24	V
Amperaje	14,8	A
Potencia	181,152	W
Torque estimado	5,77	Nm

Fuente. Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 24 el torque que tiene el rotor en estas condiciones, es de aproximadamente 72 Nm, que es la relación que existe entre la potencia de entrada (194,54W) y la velocidad angular (25, 7 rpm), este torque esta dentro del rango probado en las pruebas de campo, en donde el torque máximo que se aplicó fue de 80N.

Por otro lado, como se observa en la tabla 25 se realizaron diferentes mediciones para el generador, en donde demandando diferentes cargas, se obtuvo el punto máximo de 14,8 A ,en el cual el generador es capaz de mantener el voltaje de la batería por encima de 12 V (voltaje de la batería en vacío) lo que significa que la energía que se demanda es proveída por el generador y no es energía que se extrae de la carga inicial de la batería.

De acuerdo estos los datos de amperaje y voltaje, se determinó que la potencia eléctrica que entrega el generador es de 181W aproximadamente, lo que en comparación con la potencia de entrada de 194,54W, corresponde a una eficiencia del sistema 93% en estas condiciones de trabajo.