

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA



Turbina de Corriente Libre para Bombeo de Agua

Tesis para optar el Grado de Bachiller en Ciencias
con mención en Ingeniería Mecánica

Presentada por

Raúl Fernando Serván López

Lima — Perú

1990

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
Facultad de Ciencias e Ingeniería

TURBINA DE CORRIENTE LIBRE PARA BOMBEO DE AGUA
Tesis para optar el Grado de Bachiller en
Ciencias con mención en Ingeniería Mecánica

Presentada por
Raúl Fernando Serván López

Lima, 1990

RESUMEN:

El abastecimiento de agua para usos productivos y domésticos es uno de los problemas más graves en las zonas rurales de nuestro país. Estas necesidades energéticas pueden ser satisfechas gracias al empleo de energía renovable.

El tema analizado en la presente tesis, es la descripción y análisis de una turbina que aprovecha la energía cinética de un río. Este dispositivo se denomina turbina de corriente libre, y se presenta como una alternativa para la provisión de agua en zonas en las que no existe un salto disponible. Como se sabe, la energía cinética de un río es más "densa" (más energía por unidad de área) que la energía eólica pero no puede competir con la energía disponible en un pequeño salto.

En este trabajo se describen los diferentes tipos de turbinas de corriente libre que han sido experimentados en varios lugares del mundo, y se selecciona un tipo que luego viene presentado en detalle. Para el análisis del comportamiento de la turbina en el agua se han utilizado las relaciones que gobiernan el comportamiento de los álabes en un medio fluido, haciendo uso extensivo de las relaciones que se emplean para el dimensionamiento de aerobombas, puesto que este tipo de dispositivos son conceptualmente similares a las turbinas de corriente libre.

Entre las más importantes conclusiones a las que llega este estudio, es que una de las características geométricas indispensables e importantes en el dimensionamiento del rotor es el ángulo de setting, el cual determina el modo en que cada parte del rotor contribuye a la generación de potencia. Se ha encontrado además que para tener la facilidad de manufacturar el álabe con cuerda constante, es necesario mantener un ángulo de curvatura a lo largo del mismo, lo que permite aprovechar al máximo la energía de la corriente.

Para lograr la máxima potencia de un sistema como el propuesto, se debe tratar que el proceso de fabricación del sistema, dé dimensiones lo más cercanas posibles a las dimensiones determinadas teóricamente, y que esto sea posible de obtener a un costo razonable.

INDICE

INTRODUCCION	1
CAPITULO 1 : PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 El Problema de la Provisión de Agua en Zonas Rurales	5
1.1.1 Necesidades domésticas de agua	5
1.1.2 Necesidades de agua en la ganadería	9
1.1.3 Necesidades de agua para irrigación	9
1.2 Requerimientos de Potencia para el Bombeo	16
1.2.1 Ecuaciones para el cálculo de la potencia necesaria	16
1.2.2 Determinación de la potencia necesaria	18
1.3 Necesidad de Proveer Energía para el Bombeo	23
1.4 Medición de los Parámetros de la Corriente	25
1.4.1 Conceptos básicos	25
1.4.2 Medición de la velocidad del río	26
i) Medición con correntómetro	28
ii) Medición con molinetes	33
iii) Medición con flotadores	35
iv) Medición con bastón	36
1.4.3 Medición de la profundidad	39
i) Escandallo o lastre coaxial	40
ii) Ecosonda	41
CAPITULO 2 : DESCRIPCION DEL SISTEMA PROPUESTO	44
2.1 Descripción de las Turbinas de Corriente Libre	44
2.1.1 La bomba tipo Plata	48
2.1.2 La turbina sumergida con conducto	51
2.1.3 La Riobomba de la Universidad de los Andes	52
2.1.4 La turbina del ITDG de rotor Darrieus de eje vertical	53

2.1.5 La turbina del ITDG de rotor Propeller de eje inclinado	54
2.2 Descripción del Sistema Propuesto	55
2.2.1 Selección y descripción de la turbina	56
2.2.2 Selección y descripción de la bomba	59
 CAPITULO 3 : ANALISIS ENERGETICO	 66
3.1 Generalidades	66
3.2 Ecuaciones del sistema	66
3.2.1 Potencia necesaria para el bombeo	67
3.2.2 Energía disponible en un flujo libre	67
3.3 Diseño del Rotor	70
3.3.1 Geometría básica del rotor	71
i) Determinación del radio	71
ii) Velocidad específica de rotación o celeridad	74
iii) Número de álabes	75
iv) Tipo de álabes	76
3.3.2 Geometría del álabe	80
i) Expresiones matemáticas	81
ii) Procedimiento	83
3.4 Diseño de la Bomba	85
3.4.1 Selección de la carrera y diámetro	86
 CAPITULO 4 : DIMENSIONAMIENTO BASICO	 90
4.1 Premisas	90
4.2 Dimensionamiento Básico de la Turbina	91
4.3 Dimensionamiento Básico de la Bomba	96
 CONCLUSIONES	 99
 BIBLIOGRAFIA	 101 a 102

LISTA DE SIMBOLOS

A_a	:	Area proyectada del álabe (cuerda por longitud)
A_p	:	Area del rotor perpendicular a la corriente.
a	:	constante del molinete de medición.
B	:	Número de álabes.
b	:	constante del molinete de medición.
C	:	Factor de corrección de la medida de la velocidad promedio de un río que depende de la naturaleza del lecho del río.
C_D	:	Coeficiente de arrastre del álabe.
C_L	:	Coeficiente de sustentación del álabe.
C_{L0}	:	Valor de C_L para $\alpha = 0$.
C_L'	:	derivada de la función $C_L(\alpha)$.
C_{Ld}	:	Coeficiente de sustentación de diseño.
C_p	:	Coeficiente de potencia del rotor.
$C_{p_{max}}$:	Coeficiente de potencia máximo.
C_Q	:	Coeficiente de torque del álabe.
c	:	longitud de cuerda del álabe.
c	:	Factor de corrección de la medida de la velocidad promedio de una semisección que depende de la naturaleza del lecho del río.
d_p	:	Diámetro del pistón de la bomba.
E	:	Energía necesaria para el bombeo.
ET_0	:	Tasa de evatranspiración referencial.
ET_c	:	Tasa de evapotranspiración de un cultivo dado.
F_D	:	Fuerza de arrastre
F_L	:	Fuerza de sustentación
F_{LN}	:	Componente de F_L perpendicular al plano de rotación del rotor.
F_{LP}	:	Componente de F_L en el plano de rotación del rotor.
g	:	Aceleración de la gravedad (m/s^2).
H	:	Altura total de bombeo (m)
H_d	:	Altura de bombeo de diseño
K_c	:	Coeficiente del cultivo
L	:	Distancia que recorre el flotador usado para medir.

\dot{m}	:	Flujo de masa (en corrientes libres).
N	:	Número de revoluciones a la que gira un molinete (rev./s)
P	:	Potencia del sistema (kW).
P_c	:	Potencia cinética disponible en un flujo libre.
P_{mec}	:	Potencia mecánica
P_{hid}	:	Potencia hidráulica.
Q	:	Caudal al que será provisto el agua (m^3/s).
Q	:	Caudal medio de la bomba.
Q_d	:	Caudal de diseño de la bomba.
R	:	Radio del rotor.
S	:	Carrera del pistón de la bomba.
t	:	Tiempo promedio obtenido de varias mediciones.
u_a	:	Velocidad tangencial máxima del rotor.
V	:	Volumen de agua que debe ser provisto.
V_d	:	Volumen de diseño que debe ser provisto.
V_r	:	Velocidad relativa de la corriente.
v	:	Velocidad de la corriente en el punto ubicado a una profundidad "h".
v_d	:	Velocidad de diseño de la corriente.
v_f	:	Velocidad de la corriente en el fondo del cauce.
v_i	:	Velocidad de la corriente en el punto "i" (m/s).
v_i'	:	Velocidad medida por el instrumento.
v_H	:	Velocidad promedio de la corriente.
v_h	:	Velocidad promedio de la corriente en la semisección.
v_s	:	Velocidad superficial de la corriente.
v_s	:	Velocidad de la corriente en la superficie de la semisección.
v_x	:	Velocidad en un punto ubicado a "x" partes de la profundidad a partir de la superficie.
v_o	:	Velocidad media de la corriente en la sección A_p .
W	:	Profundidad de la corriente en una semisección.
w	:	Profundidad de la corriente en un punto dado.

α	:	Angulo de ataque del álabe.
β	:	Angulo de setting.
Δh	:	incremento de altura, en la medición con bastón medidor.
η	:	Eficiencia.
η_{bomba}	:	Eficiencia de bomba.
$\eta_{\text{conduccion}}$:	Eficiencia de conducción.
η_{rotor}	:	Eficiencia del rotor (Cp).
η_{total}	:	Eficiencia total del sistema.
$\eta_{\text{transmisión}}$:	Eficiencia de transmisión.
η_v	:	Eficiencia volumétrica de la bomba.
ϕ	:	Angulo de flujo.
λ	:	Velocidad específica o celeridad.
λ_d	:	Celeridad de diseño.
λ_r	:	Celeridad en el punto r.
$\lambda_{r d}$:	Celeridad de diseño en el punto r.
θ	:	Angulo del aparato medidor con la dirección de la corriente.
Ω	:	Velocidad angular del rotor.

INTRODUCCION

La turbina de corriente libre es un dispositivo mecánico que extrae la energía cinética de una corriente fluida libre, como un río o canal, y, a través de fuerzas de sustentación y arrastre, la convierte en energía mecánica. Este tipo de dispositivos pueden ser usados en situaciones donde no es posible crear un salto estático de agua o construir algún tipo de dique o represamiento para el empleo de turbinas convencionales.

Las corrientes libres son una fuente de energía muy difusa, basta decir, por ejemplo, que la energía cinética de un río con una velocidad de 1 m/s es equivalente, en términos energéticos, a un salto hidráulico de sólo 50 mm; por tanto, donde fuera posible utilizar un salto, éste debe ser usado en lugar de la corriente libre de un río.

Los sistemas de bombeo propulsados por energía hidráulica (en este caso, la corriente de un río) generalmente dependen mucho de las condiciones del sitio, por lo que difícilmente pueden competir con

otros sistemas de bombeo. Pese a todo, cuando hay sitios con las condiciones adecuadas, los sistemas hidráulicos se presentan como una buena alternativa, especialmente si se considera que es una fuente que provee energía veinticuatro horas al día.

Por otro lado, la principal dificultad que se encuentra en el uso de la hidroenergía para bombeo es que generalmente donde existe un río o una corriente se dispone ya de agua, dado que estas zonas cuentan con abundante precipitación; por tanto, las turbinas de corriente libre son convenientes en las zonas llanas, en donde no es posible usar las diferencias de cota para llevar el agua donde se requiere. En el caso del Perú, las turbinas de corriente libre pueden ser aptas para ciertas zonas de la costa, especialmente en el período de siembra (cuando también el río tiene mayor caudal), y en zonas de selva baja, donde puede proveer agua directamente a los pequeños poblados dispersos en zonas algo lejanas de los ríos.

Existen tres principales aplicaciones a pequeña escala que requieren típicamente potencia en el eje en el rango 200-600 W, que es el rango de las turbinas de corriente libre. Estas son:

- Sistemas de irrigación (con altura de bombeo menor de 10 m y área de irrigación en el rango 0,25 - 4 ha).
- Sistemas de provisión de agua para usos domésticos, con menos de 30 m de altura de bombeo y poblaciones en el orden de 300-1500 personas.
- Provisión de agua para ganadería, con menos de 30 m de altura de bombeo y número de cabezas de ganado de aproximadamente 2000.

En la presente tesis se describirán las principales consideraciones que se deben tener en cuenta para la selección de un sistema de bombeo, así como también el procedimiento que se debe

seguir para llevar a cabo las mediciones que permiten establecer la factibilidad de las turbinas de corriente libre en un lugar dado (capítulo 1). A continuación se presentarán las características principales del sistema propuesto, comparándolo con otras alternativas de bombeo (capítulo 2), para luego presentar la metodología de cálculo para dimensionar el sistema (capítulo 3). En esta parte del trabajo se hará uso extensivo de las teorías desarrolladas para el análisis energético de sistemas de bombeo eólico, adaptandólas a las condiciones de una corriente con las características de un río. Para concluir (capítulo 4), se procederá al dimensionamiento básico de un sistema de bombeo de turbina de corriente libre.

Como parte final del trabajo se presentarán las conclusiones a las que se puede llegar a partir de este estudio, así como algunas recomendaciones para la profundización del tema tratado en la presente tesis.

CAPITULO 1 : PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente capítulo tiene por objeto plantear la naturaleza e importancia del problema de la provisión de agua en zonas rurales, así como describir el tipo de datos necesarios para el adecuado dimensionamiento de un sistema de bombeo; es decir, los datos que permiten determinar la cantidad de agua necesaria en relación a las actividades domésticas y productivas que se realizan en las zonas rurales, para cuantificar el volumen de agua que deberá ser provisto con el sistema de bombeo y poder calcular posteriormente la energía necesaria para lograrlo. Dado que la energía será provista por la velocidad de una corriente de agua - en este caso un río - se presentarán brevemente diversos métodos que pueden ser usados para medir con precisión adecuada la velocidad de la corriente, lo que permitirá obtener datos para cuantificar la cantidad de energía que puede ser extraída a partir de ésta.

Los datos necesarios para este cálculo serán entonces: el volumen diario de agua requerido, la energía necesaria para el bombeo y la energía disponible en la corriente a partir de su velocidad. La

medición de la profundidad de la corriente es también importante, dado que ésta limita las dimensiones máximas de la turbina de corriente libre.

1.1 El Problema de la Provisión de Agua en Zonas Rurales

Uno de las necesidades más importantes en las zonas rurales es el agua, el cual es indispensable para la sobrevivencia de la población. En efecto, ésta es indispensable no sólo para la higiene y el desarrollo de actividades productivas como la agricultura y la ganadería, sino también para actividades vitales como la preparación y la cocción de alimentos.

El aprovisionamiento de agua es quizás el factor más importante para el desarrollo, pues es indispensable para la higiene, la salud, la educación, la agricultura, etc.

En las zonas rurales el agua viene principalmente utilizada en actividades relacionadas con el sector doméstico, con la agricultura (irrigación) y con la ganadería.

En la tabla 1.1, en la página siguiente, se presentan los volúmenes de agua que se estiman necesarios a nivel internacional para la sobrevivencia de las personas y para el desarrollo de diferentes actividades en zonas rurales.

1.1.1 Necesidades domésticas de agua

En los hogares el agua es usado principalmente para consumo humano directo, para la higiene personal y para el lavado de los vestidos y artefactos de cocina. El volumen de agua extraído de un lugar dado varía en función de su ubicación con respecto a la población y de la cantidad de agua disponible en ése y otros lugares cercanos.

TABLA 1.1: CONSUMO DIARIO DE AGUA EN ZONAS RURALES

	(1)	(2)
1.- Usos Domésticos (por persona):		
Sobrevivencia	5 l	5 l
Mínimo indispensable	10 l	--
Condiciones normales de vida	30 l	--
Lugar de aprovisionamiento lejano ..	--	10 l
Lugar de aprovisionamiento cercano .	--	30 l
Una conexión por casa	--	50 l
Múltiples conexiones por casa	--	200 l
2.- Ganadería (por cabeza):		
Ovinos	4 l	5 l
Asnos	20 l	20 l
Caballos	40 l	20 l
Bovinos	40 l	35 l
Porcinos	--	15 l
Aves de corral (por centenar)	--	25 l
3.- Agricultura (por hectárea):		
Cereales	45 m ³	--
Algodón	55 m ³	--
Caña de azúcar	65 m ³	--
Arroz	100 m ³	--

(1) Fuente: Ref. [1].

(2) Fuente: Ref. [2].

Se ha establecido además que la demanda de agua per cápita varía en función de la distancia que se debe recorrer para aprovisionarse de ésta. Lógicamente, cuanto mayor es la distancia del punto de donde se toma el agua, y mayor por tanto el trecho que ésta debe ser transportada, menor es la cantidad de agua utilizada por persona. Así por ejemplo, para distancias de transporte del agua entre 500 y 1000 metros, el valor típico de la demanda oscila entre 10 y 15 litros por persona por día, mientras que en el caso de conexiones individuales (en cada casa) el consumo varía entre 30 y 50 litros por persona por día (ref. [3], ver también la Tabla 1.1).

Por otro lado, diversas instituciones nacionales e internacionales han establecido estándares basados en las cantidades promedio de agua requeridas para satisfacer determinadas necesidades, con el objetivo de establecer los volúmenes de agua que deberán ser provistos en los diferentes programas y proyectos de salud y desarrollo. Por ejemplo, en 1970 un estudio llevado a cabo por la Organización Mundial de la Salud (OMS) encontró que en los países en desarrollo el consumo de agua promedio variaba de 35 a 90 litros por persona por día. Como consecuencia, se propuso como objetivo a corto plazo para los programas de salud, el proveer, como meta razonable, 40 litros por persona por día (ref. [4]).

A pesar de esto, la mayoría de las organizaciones que trabajan en el sector salud estiman como nivel aceptable (o norma) para las zonas rurales, la provisión de 20 litros diarios de agua por habitante. Se considera además, que 50 litros diarios por persona (20 para necesidades propias, 20 para mantener media cabeza de ganado por persona y 10 para mantener un pequeño huerto) es lo necesario para iniciar el desarrollo económico.

Según lo anterior, a nivel de poblados, las necesidades de agua serían las mostradas en la tabla siguiente:

TABLA 1.2: REQUERIMIENTOS DE AGUA DE UN POBLADO
(m³ de agua por día)

Número de habitantes	Norma 20 l/hab/día	Norma 50 l/hab/día
250	5	12,5
500	10	25
750	15	37,5
1000	20	50
1500	30	75
2000	40	100

Fuente : Ref. [5].

En la tabla anterior las cantidades han sido estimadas simplemente multiplicando la cantidad de habitantes por el consumo diario por persona; sin embargo, existen variaciones durante el día o durante la semana que deben tomarse en cuenta al momento de determinar los requerimientos de agua de un poblado para el dimensionamiento de un sistema de bombeo. Por lo general, mientras más pequeño es el poblado, más grande es la variación. Los días en que se establece un mercado o en que se llevan a cabo celebraciones locales pueden tener una gran influencia en el consumo diario de agua. Diferentes experiencias han encontrado, por ejemplo, los valores mostrados en la Tabla 1.3 para las variaciones máximas en el consumo, en relación al consumo promedio.

En esta tabla, se entiende por hora y día "máximo" la hora y el día de máximo consumo, mientras que hora y día "promedio" representan el consumo promedio durante el resto de la jornada y los demás días. Esto significa, por ejemplo, que el consumo de agua en la hora de consumo máximo de la jornada puede duplicar o triplicar el consumo promedio de las horas del resto del día.

TABLA 1.3: VARIACIONES AL CONSUMO PROMEDIO

	Relación Normal	Relación Promedio
Hora máxima/Hora promedio	2,0-3,0 : 1	2,5 : 1
Día máximo/Día promedio	1,2-2,0 : 1	1,5 : 1

Fuente : Ref. [6].

1.1.2 Necesidades de agua en la ganadería

La cantidad de agua necesaria para llevar a cabo esta actividad es considerablemente alta, variando entre 5 y 40 litros por cabeza por día (para ganado ovino y bovino, respectivamente); sin embargo, a diferencia de las actividades agrícolas (que veremos a continuación), el consumo de agua varía poco estacionalmente.

Para prevenir el sobrepastoreo en los lugares donde se establecen puntos de aprovisionamiento de agua para el ganado, cada bebedero deberá ser construido de tal forma que no abastezca demasiadas cabezas de ganado. Por ejemplo, se puede escoger como cantidad máxima 500 animales, lo que da un consumo total de agua de 20 metros cúbicos diarios (para datos sobre el consumo de cada tipo de ganado, consultar la Tabla 1.1, página 6).

1.1.3 Necesidades de agua para irrigación

La cantidad de agua necesaria para el desarrollo de la agricultura depende de varios factores, entre los cuales los más importantes son (ref. [7]):

- Naturaleza del cultivo
- Ciclo de crecimiento del cultivo
- Condiciones climáticas del lugar (temperatura, lluvias, etc.)
- Tipo y condiciones del suelo
- Topografía del lugar
- Eficiencia del transporte del agua
- Eficiencia en la aplicación del agua
- Calidad del agua
- Gestión del agua

Muchos de estos factores varían durante el ciclo de crecimiento de la planta por lo que, consecuentemente, la cantidad de agua

requerida por los cultivos puede presentar variaciones estacionales e inclusive diarias.

La cantidad de agua necesaria para la agricultura es generalmente provista por diversas fuentes (lluvias, infiltración, irrigación, etc.). Para los fines de este trabajo, consideraremos que todo el agua necesaria para el desarrollo de los cultivos será provisto mediante irrigación. Teniendo en cuenta lo anterior, se debe tener presente que la cantidad de agua necesaria para la irrigación es tal, que la provisión de agua debe ser realmente económica para que la irrigación sea rentable, pues el valor agregado del producto (por metro cúbico de agua) es muy bajo. Como ejemplo podemos citar que para producir cinco toneladas de maíz, son necesarios más de doce mil metros cúbicos de agua (ref. [8]). Por otra parte, los requerimientos de agua de los cultivos pueden ser altos, ya que varían mucho estacionalmente, y en ciertos períodos puede llegar a 60,000 l/día/ha ó 6 mm diarios (en el lenguaje técnico de irrigación, se prefiere indicar el volumen de agua por hectárea en milímetros, con la equivalencia siguiente $1 \text{ mm} = 10,000 \text{ l/ha}$). La cantidad de agua necesaria, como ya se dijo, también depende del sistema de irrigación escogido, el cual puede tener diferente performance dependiendo de las pérdidas por infiltración, evaporación y otros. La eficiencia total de los sistemas de irrigación que utilizan canales abiertos revestidos es del orden del 50 %, mientras que un sistema que utiliza tuberías tiene eficiencias de hasta 85 % (ref. [9]).

El proceso de abastecimiento de agua a los cultivos es relativamente complejo; como se sabe, las plantas toman el agua que les sirve de la humedad contenida en el suelo en las zonas vecinas a la raíz. El suelo actúa como un reservorio de agua para las plantas, y por tanto la humedad del suelo debe ser restituida (por irrigación) antes que el nivel de humedad alcance el punto de marchitamiento, que

es aquél en donde se produce un daño irreversible para el cultivo; por el contrario, la cantidad máxima de agua que puede almacenar el suelo se logra cuando éste está saturado. Un exceso de agua puede producir daños en ciertos cultivos; y aún si no es así, una mayor cantidad de agua significa siempre un desperdicio. Para cada cultivo existe una humedad del suelo óptima, en la cual el crecimiento de las plantas es máximo; esta humedad óptima varía con los diversos períodos del crecimiento de la planta, por lo que no es fácil mantener siempre la humedad adecuada. El arte de una eficiente irrigación consiste por tanto en lograr mantener la humedad del suelo lo más cercana posible a la humedad óptima para ese cultivo en ese determinado período de su desarrollo; es decir, mantener la humedad del suelo entre el punto de marchitamiento y el punto de saturación del suelo (o capacidad del suelo).

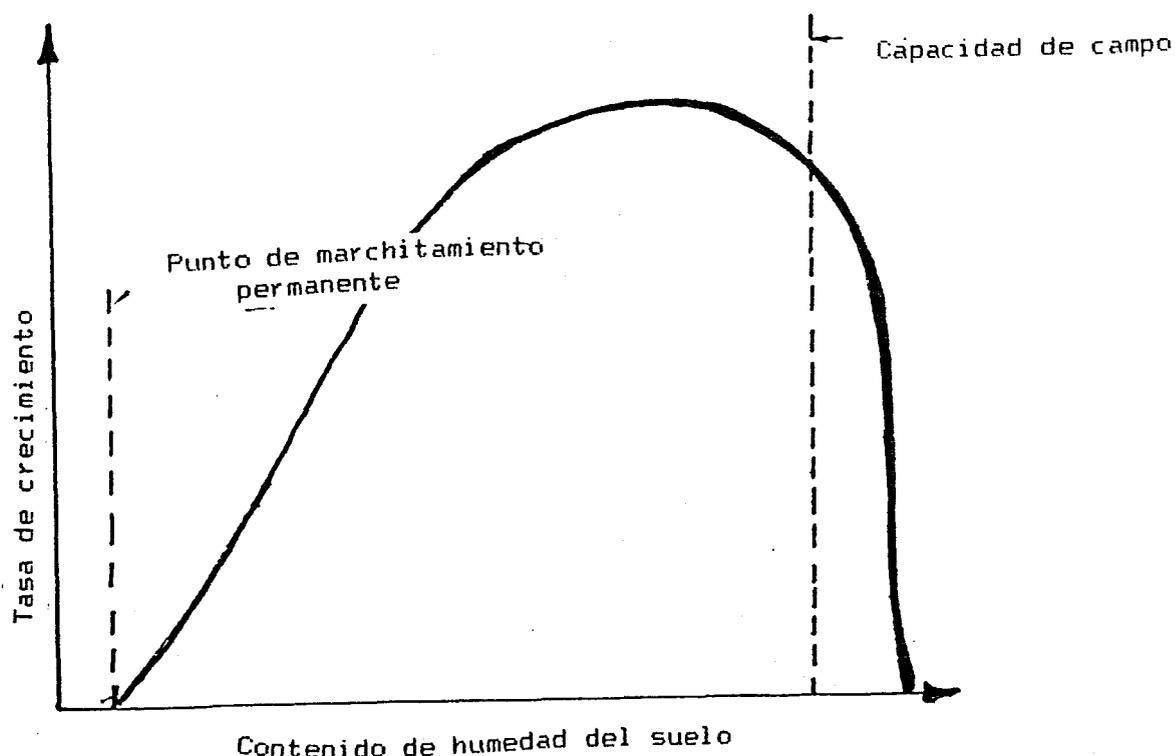


Figura 1.1 : Crecimiento de un cultivo en función de la humedad del suelo

Fuente: Ref. [10].

Para calcular los requerimientos de agua para la irrigación es necesario calcular inicialmente las necesidades de agua del cultivo escogido. Para esto, se calcula la tasa de evapotranspiración referencial (ET_0), que es un valor estándar que depende de las condiciones climáticas. Dado que ET_0 depende del clima, varía de mes a mes, y en algunos meses puede llegar a ser el doble que en los otros.

La evapotranspiración de un cultivo dado (ET_c) se obtiene mediante (ref. [11]):

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (1.1)$$

En donde K_c es el coeficiente del cultivo, y depende del tipo de cultivo, su estado de crecimiento, la estación y las condiciones climáticas. K_c varía entre 0,3 y 1,0 al inicio del crecimiento de la planta y al final, respectivamente. Por tanto, ET_c (ver ecuación anterior) varía considerablemente durante el crecimiento de la planta.

El requerimiento neto de irrigación en cada momento equivale a la diferencia entre ET_c y las eventuales contribuciones de agua debido a lluvias, aguas subterráneas o humedad almacenada en el suelo. Debe tenerse en cuenta que no todo el agua proveniente de las lluvias puede ser aprovechada por las raíces de las plantas y debe considerarse además que a veces es necesaria una gran cantidad de agua para la preparación del suelo antes de la siembra (por ejemplo cuando se siembra arroz). Estos datos se deben tener en consideración al momento de evaluar la cantidad neta de agua de irrigación necesaria.

Se puede citar por ejemplo, que ha sido encontrado (ref.[12]) que los requerimientos típicos de agua para cultivos en zonas tropicales, utilizando adecuados sistemas de irrigación, pueden variar entre 4000-13000 m³/ha; lo que equivale a 400-1300 mm de agua por cultivo, que, teniendo en cuenta que el ciclo de crecimiento de una planta es de 100-150 días, significa un requerimiento diario de 30-130 m³/ha (3-13 mm/día). Dado que la demanda de agua varía durante el período de crecimiento, el requerimiento máximo (pico) puede ser incluso el doble del requerimiento promedio, implicando una demanda máxima en torno a los 50-200 m³/ha/día.

Proveer menos agua de la cantidad óptima generalmente no matará la planta, pero se obtendrán rendimientos menores (ver figura 1.1, página 11). Del mismo modo, excesos en la provisión de agua significarán no sólo desperdicio de ésta y de la energía utilizada, sino también rendimientos menores.

Al volumen obtenido como requerimiento neto de agua, debe agregarse las pérdidas debidas al transporte, lo que dará el requerimiento bruto de irrigación. Eficiencias típicas de transporte, y de distribución del agua en el campo se dan en la tabla 1.4 en la siguiente página.

TABLA 1.4: EFICIENCIA DE IRRIGACION

EFICIENCIA PROMEDIO DE TRANSPORTE DEL AGUA

Método de Irrigación	Método de Distribución del agua	Area Irrigada (ha)	Eficiencia (%)
Pozas para cultivar arroz	Continuo sin variaciones sustanciales en el flujo	--	90
Irrigación superficial (Pozas, bordes y surcos)	Rotativo basado en un calendario predefinido y una gestión eficaz.	3000-5000	88
	Rotativo basado en un calendario predefinido y una gestión menos eficaz.	< 1000 >10000	70
	Rotativo basado en demanda previa.	< 1000 >10000	65

EFICIENCIA PROMEDIO DEL CANAL

Método de Irrigación	Método de Distribución	Tipo de Suelo y Condición del Canal	ha	Efic. (%)
Pozas para Arroz	Continuo	No revestido (arcilloso) Revestido o tubería	≤ 3	90
Irrigación Superficial	Rotación o Intermitente	No revestido (arcilloso) Revestido o tubería	< 20 > 20	80 90
		No revestido (lig. arc.) Revestido o tubería	< 20 > 20	60-70 80
	Rotación o Intermitente	No revestido (arenoso) Revestido o tubería	< 20 > 20	55 65

EFICIENCIA PROMEDIO DE APLICACION

Método de Irrigación	Método de Distribución	Tipo de Suelo	Profundidad de Irrigación (mm)	Eficiencia (%)
Pozas	Continuo	Arcilloso	> 60	40-50
Surcos	Intermitente	Ligero	> 60	60
Bordes	Intermitente	Ligero	> 60	60
Pozas	Intermitente	Cualquiera	> 60	60
Aspersión	Intermitente	Arenoso-limoso	< 60	70

Fuente : Ref. [13].

Los datos de la tabla anterior indican que la eficiencia del transporte oscila entre 65-90 por ciento, dependiendo del sistema utilizado, mientras que la eficiencia promedio de los canales es del orden del 55-90%. Por tanto, la eficiencia de irrigación (a la salida del sistema de distribución) será el producto de ambas, o sea, 30-80%.

Esto significa que mejoras en el sistema de irrigación pueden permitir un dimensionamiento menor del sistema de bombeo, con consiguientes ahorros de energía y dinero, a menos que el costo del agua bombeada sea muy bajo y el sistema de distribución del agua sea más costoso.

El sistema de bombeo por tanto, deberá ser dimensionado teniendo en cuenta la demanda promedio y la demanda máxima de agua durante la estación de crecimiento del cultivo. Luego de haber determinado la cantidad diaria de agua necesaria para las plantas, se debe determinar la tasa de alimentación, dado que diferentes tipos de suelo absorben el agua a diferentes velocidades. El caudal con el que puede irrigarse un determinado terreno deberá ser menor que el valor máximo de su tasa de absorción; con estos datos, se determinará la cantidad de horas necesarias para la irrigación, y en consecuencia, la potencia del sistema de bombeo. Ver la tabla siguiente.

TABLA 1.5: TASA DE ABSORCIÓN PROMEDIO PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO

Tipo de Suelo	Tasa de Absorción (mm/hora)	Caudal recomendado (l/s/ha)
Arenoso	50 (25 - 250)	140
Areno-limoso	25 (15 - 75)	70
Limoso	12,5 (8 - 20)	35
Arcillo-limoso	8 (2,5 - 10)	7
Arcilloso-fango	2,5 (0,03 - 5)	7
Arcilloso	5 (1 - 15)	14

Fuente : Ref. [14].

El volumen diario de agua necesario para los cultivos, que deberá ser provisto mediante irrigación, como se ha visto, puede ser calculado con gran aproximación con la ayuda de tablas y expresiones matemáticas; sin embargo, la irrigación es en sí una actividad compleja, por lo que se recomienda una mayor especialización al momento de determinar de modo preciso estas cantidades. El dimensionamiento del sistema de bombeo (cálculo de la potencia) depende de lo anterior y de la tasa de absorción del suelo. En lo que sigue del presente trabajo, para el dimensionamiento se tomarán como referencias los datos mostrados en las tablas 1.1 a 1.5.

1.2 Requerimientos de Potencia para el Bombeo

1.2.1 Ecuaciones para el cálculo de la potencia necesaria

La determinación del volumen de agua que debe ser provisto por el sistema de bombeo, permite calcular la energía necesaria para tal fin y los requerimientos de potencia del sistema.

De la teoría elemental de mecánica de fluidos, se puede deducir para un sistema de bombeo, que la energía diaria necesaria para bombear un volumen (V) a una altura (H) se puede calcular mediante la fórmula siguiente:

$$E = \rho \cdot V \cdot H \cdot g / \eta_r \quad (1.2)$$

En donde:

E : energía necesaria por día (J/día)

ρ : densidad del agua (1000 kg/m³)

V : volumen de agua que debe ser provisto diariamente
(m³/día)

H : altura total de bombeo (m)

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

η_r : eficiencia total del sistema

Si la energía que se quiere determinar con esta fórmula es la que debe ingresar a la turbina, la eficiencia total será el producto de la eficiencia de la turbina, la eficiencia de la transmisión, la eficiencia de la bomba, la eficiencia del sistema de transporte y la eficiencia de distribución. Si la energía que se quiere determinar es la que debe salir de la turbina, la eficiencia total no incluye la eficiencia de la turbina. Al respecto, ver figura 1.3, página 22.

De la ecuación anterior se puede deducir que:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / \eta_T \quad (1.3)$$

En donde:

P : potencia hidráulica necesaria para el bombeo (W)

ρ : densidad del agua (kg/m^3)

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

Q : caudal de salida (m^3/s)

H : altura total de bombeo (m)

η_T : eficiencia total del sistema (%)

El caudal (Q) se determina en función del número de horas que trabajará el sistema de bombeo. Mientras menor sea el caudal, menores serán las dimensiones de la turbina de corriente libre y del sistema en general.

La potencia necesaria se determina gracias a la ecuación (1.3), asumiendo que el sistema funcionará en forma continua durante la jornada. Es decir, dividiendo el volumen diario por el número de segundos al día:

$$Q (\text{m}^3/\text{s}) = V(\text{m}^3/\text{día})/86400 \quad (1.4)$$

Reemplazando en la ecuación (1.3), se obtiene:

$$P = \rho \cdot V \cdot H \cdot g / 86400 \cdot \eta_T \quad (1.5)$$

En donde :

P : potencia del sistema (W)

ρ : densidad del agua (kg/m^3)

V : volumen de agua que debe ser provisto ($\text{m}^3/\text{día}$)

H : altura total de bombeo (m)

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

η_T : eficiencia total del sistema

1.2.2 Determinación de la potencia necesaria

Para el caso de abastecimiento doméstico o provisión de agua para la ganadería, el cálculo de los requerimientos de potencia del sistema es relativamente directo. En efecto, el volumen diario total de agua necesario en estos casos se determina simplemente multiplicando los datos de consumo per cápita diarios por el número total de individuos; a continuación se consideran las variaciones máximas al consumo promedio para así obtener el máximo requerimiento de agua en una jornada. En este caso se determina el volumen máximo pues proveer más agua de la necesaria no tiene efectos negativos.

Se puede considerar la posibilidad de incluir un sistema de almacenamiento (tanques, etc.) para obtener menores dimensiones del sistema de bombeo, pero esta alternativa debe evaluarse adecuadamente, pues por lo general este tipo de consumo presenta ligeras variaciones estacionales. Por tanto, en el caso específico de turbinas de corriente libre la inclusión o no de un sistema de almacenamiento dependerá de las características del río a través de la jornada y del año; pese a todo es preferible, técnica y económicamente, sobredimensionar ligeramente el sistema que tener que incorporar un sistema de almacenamiento.

El caso de abastecimiento de agua para irrigación, como ya se indicó precedentemente, es sustancialmente diverso (ver página 9, necesidades de agua para irrigación). En la irrigación, no sólo se debe tener en cuenta el volumen necesario de agua para el cultivo, sino que este volumen varía estacionalmente, y muchas veces, hasta diariamente. Por otra parte, la tasa de absorción del suelo y su permeabilidad son factores que condicionan el máximo caudal que puede proveer el sistema de bombeo, y en consecuencia la potencia de éste.

A pesar que el adecuado dimensionamiento de un sistema de irrigación es una tarea compleja, presentamos a continuación algunos datos útiles para la determinación aproximada del volumen de agua requerido (y potencia del sistema de bombeo) para parcelas de tamaño medio.

En estos casos, la potencia instalada necesaria depende principalmente de cuatro factores: requerimientos de agua del cultivo en el período de punta ($m^3/ha/día$), altura manométrica total (m), número de horas diarias de bombeo y dimensiones de la superficie que será irrigada. A manera de ejemplo, se puede decir que con una altura manométrica de 10 m se necesita aproximadamente 0,75 hp (0,56 kW) de potencia instalada por cada hectárea (ref. [15]).

El nomograma de la página siguiente permite mostrar claramente la influencia de los diferentes parámetros de la irrigación al momento de determinar la potencia instalada necesaria.

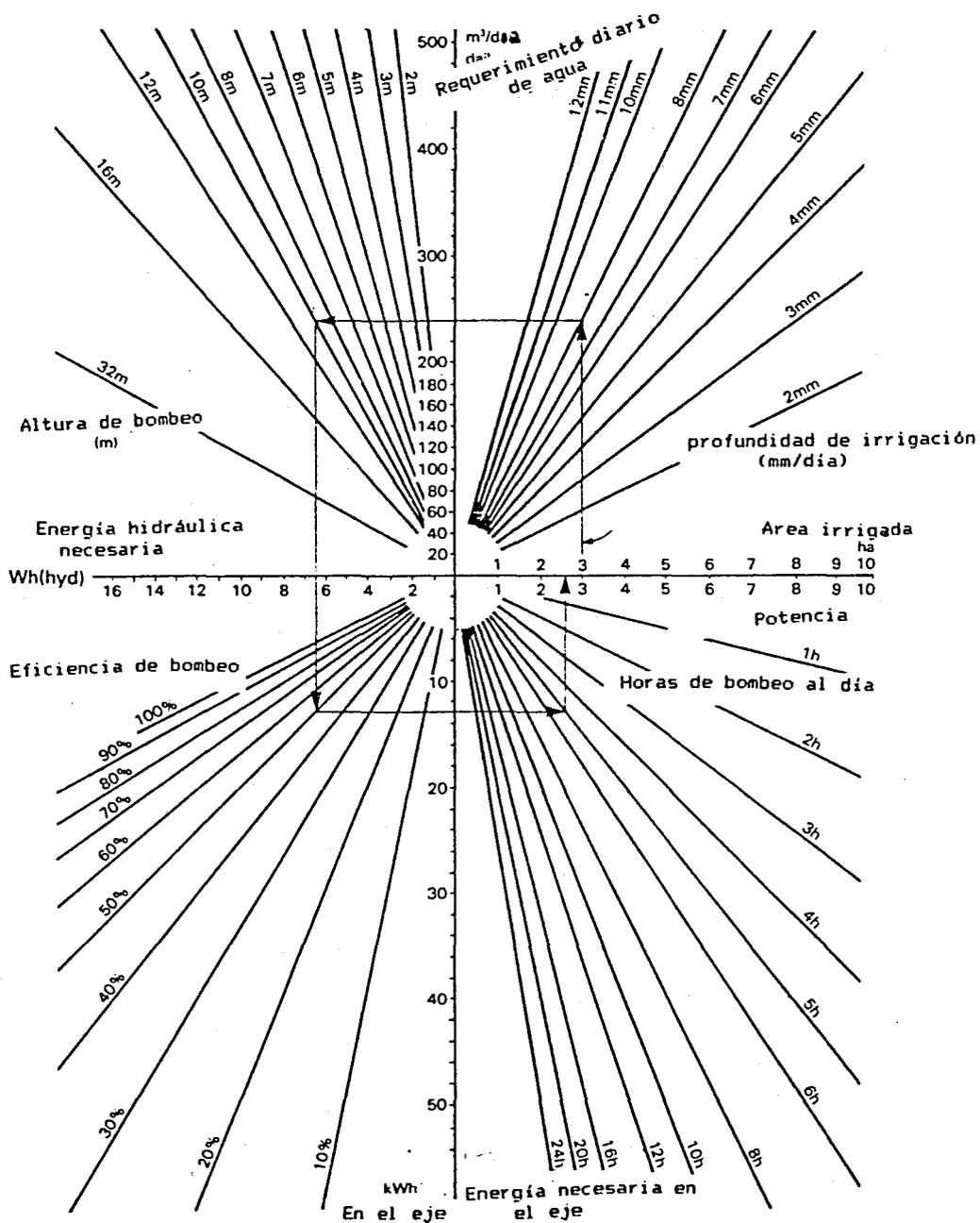


Figura 1.2 : Nomograma para calcular la potencia necesaria para un área, profundidad de irrigación y altura dados.

Fuente: Ref. [16].

En el nomograma anterior no se consideran las pérdidas de campo y de distribución del agua, por lo que la profundidad de irrigación utilizada (mm/día) debe ser el requerimiento bruto de irrigación y no el neto (ver página 13). La potencia obtenida es la potencia media necesaria en el eje, por lo que la potencia del sistema será considerablemente mayor.

El gráfico de la página siguiente resume el flujo energético a través de un típico sistema de irrigación, indicando el porcentaje de energía que es transmitido de un componente al otro.

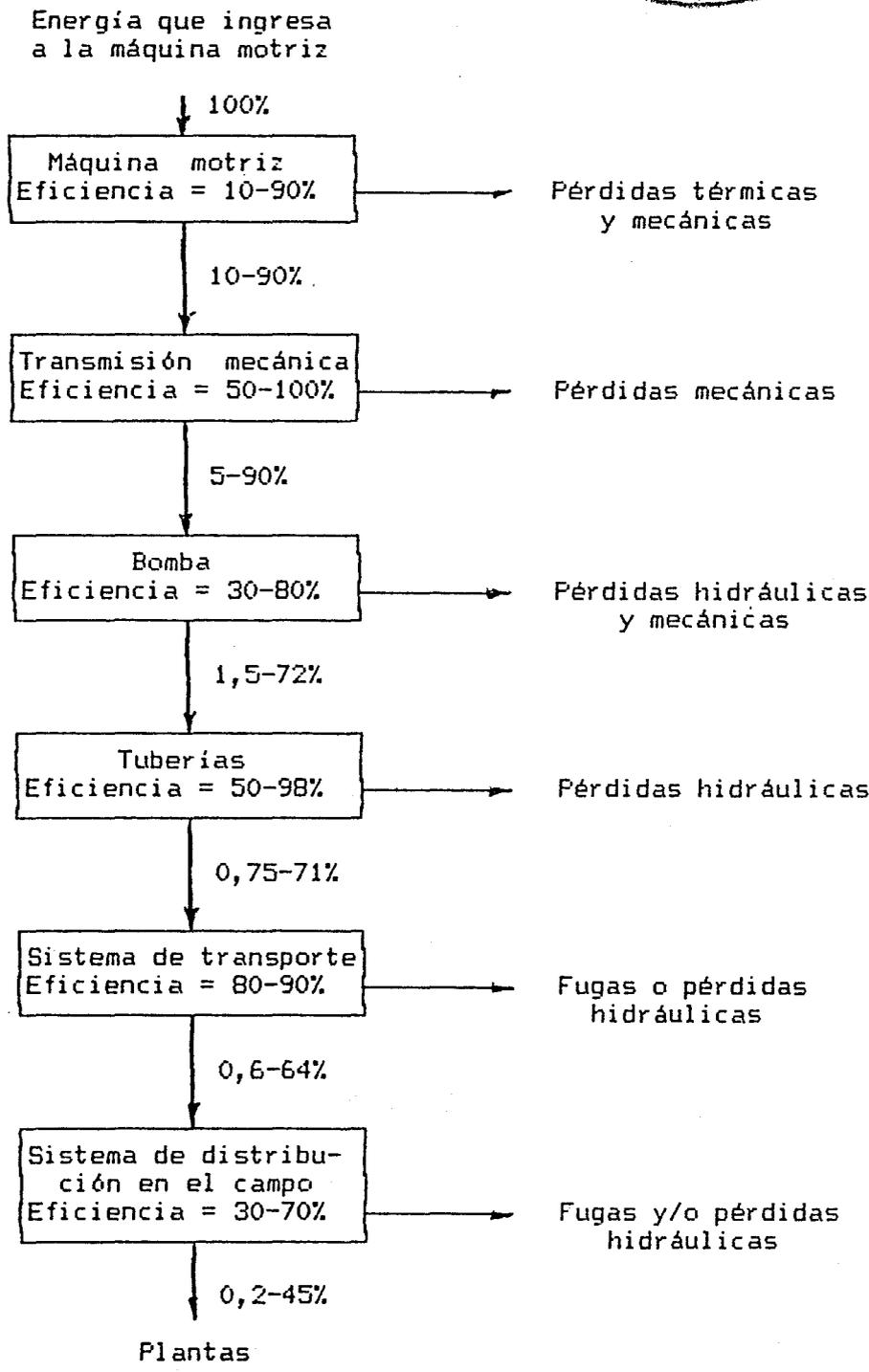
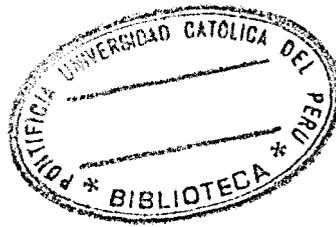


Figura 1.3: Flujo energético a través de un sistema de irrigación

Fuente : Ref. [17].

1.3 Necesidad de Proveer Energía para el Bombeo

En las secciones precedentes hemos presentado los datos que permiten calcular el volumen necesario de agua para diferentes actividades en zonas rurales. Pero la provisión de agua en sí no es el único problema, pues como es sabido, generalmente la carencia de agua está asociada a la carencia de fuentes energéticas para el bombeo.

Al respecto se puede indicar que existen una variedad de fuentes de energía que pueden ser utilizadas para el bombeo; su aplicabilidad a un caso preciso depende de la disponibilidad, confiabilidad y rentabilidad del recurso en la zona donde se necesita el agua. En esta tesis analizaremos los sistemas propulsados hidráulicamente, pues el objetivo de este trabajo es el de proponer un sistema de bombeo que pueda funcionar en regiones aisladas en donde no es posible aprovechar en manera rentable otras fuentes de energía.

Existen diversos tipos de dispositivos para bombeo que funcionan aprovechando la energía hidráulica de un río. Algunos de éstos explotan la energía potencial debido a una diferencia de cotas -como las turbinas convencionales-, mientras que otros, como es el caso de las turbinas de corriente libre, explotan la energía cinética de la corriente del río.

La Tabla 1.6 presenta algunos de los sistemas hidráulicos que pueden ser utilizados para obtener energía para el bombeo de agua, así como la eficiencia típica de cada uno de estos dispositivos. Debe indicarse que, con excepción de la turbo-bomba y las bombas de ariete hidráulico, los demás dispositivos convierten la energía hidráulica en energía mecánica, por lo que la eficiencia mostrada es sólo la eficiencia del dispositivo, y no la del sistema de bombeo, para el cálculo de la cual debería considerarse además las pérdidas debido a

la transmisión y a la bomba. En el caso de las turbo-bombas y las bombas de ariete hidráulico, la eficiencia indicada en la tabla es la eficiencia total del sistema (energía hidráulica obtenida/energía hidráulica utilizada).

En esta tesis -como se verá en el segundo capítulo- se propone el aprovechamiento de la energía cinética de la corriente de un río como forma de proveer energía para el bombeo. El dispositivo propuesto se denomina turbina de corriente libre y la potencia que puede proveer depende estrechamente de la velocidad de la corriente. Este tipo de turbinas, a pesar de tener una eficiencia menor a la de otros dispositivos, presenta especiales características que le permiten ser una alternativa para el bombeo. En efecto, las turbinas de corriente libre, como se ha mencionado previamente, extraen la energía cinética de la corriente de un río, en forma independiente del caudal y del salto, convirtiéndola en energía mecánica que puede ser utilizada para el bombeo. Dadas sus características, no implican la construcción de obras civiles, tales como represamientos y casas de fuerza, para poder trabajar adecuadamente. Como ventajas adicionales, se ha encontrado (ref. [18]) que requieren mantenimiento poco frecuente (una vez al mes), son fáciles de construir y pueden ser reparadas por personal de nivel medio, por otra parte, el costo inicial de construcción e instalación es bajo, al igual que los costos recurrentes.

TABLA 1.6: EFICIENCIA DE SISTEMAS DE BOMBEO ACCIONADOS HIDRAULICAMENTE

Tipo de dispositivo de bombeo	Eficiencia (típica)
Rueda hidráulica (golpeada por abajo)	0,30-0,40
Molino hidráulico de eje vertical	0,20-0,35
Rueda hidráulica tipo Poncelet	0,50-0,65
Rueda hidráulica (golpeada por arriba)	0,50-0,70
Turbina de impulso	0,70-0,85
Turbina de reacción	0,60-0,80
Motor de presión de agua	0,60-0,80
Turbo-bomba (tipo chino)	0,35-0,50
Bomba de ariete hidráulico	0,30-0,60
Turbina de corriente libre	0,25-0,30

Fuente : Ref. [19].

1.4 Medición de los Parámetros de la Corriente

Para el presente estudio, los parámetros más importantes de la corriente para el presente estudio son la velocidad (para determinar la energía disponible en el flujo), y la profundidad, que permite determinar las dimensiones máximas que podrá tener la turbina. El caudal no es un parámetro importante puesto que las turbinas de corriente libre utilizan sólo la energía cinética contenida en el flujo y no la energía potencial; por tanto, en este capítulo no se tratarán los métodos de medición del caudal, dejando establecido que éstos pueden encontrarse en la bibliografía común para el dimensionamiento de turbinas hidráulicas convencionales.

1.4.1 Conceptos básicos

Existen varios métodos y técnicas que pueden ser empleados para determinar la velocidad de la corriente de los ríos en los que se quiera usar turbinas de corriente libre. Estos presentan diversos grados de complejidad y obtienen datos con diferentes grados de precisión; sin embargo, para la mayor parte de los casos, las mediciones que permiten obtener dos cifras significativas son suficientes para obtener el grado de precisión requerido para el dimensionamiento (ref. [20]). Es necesario indicar que el caudal y la velocidad de un río pueden variar considerablemente durante el año; por tanto, es más importante realizar frecuentes mediciones a lo largo del año que realizar mediciones muy precisas en un período breve.

Cuando se utilizan datos provenientes de mediciones debe tenerse presente que pueden introducirse errores durante dos tipos de actividades: cuando se realizan físicamente las mediciones y cuando los datos se manipulan matemáticamente.

Debe recordarse que al momento de llevar a cabo las mediciones, los resultados no pueden ser más precisos que los instrumentos usados para realizarlas. Por otra parte, la precisión de las mediciones dependerá también de las condiciones del río, del número de pruebas, y de la experiencia y habilidad de la persona que realiza la medición, entre otras cosas.

Cuando se manipulan los datos, sumándolos o restándolos, el resultado no puede tener mayor precisión que la medición menos precisa. La regla para la multiplicación y división de datos es mucho más análoga.

1.4.2 Medición de la velocidad del río

Por lo general se asume que el flujo en un río se comporta dinámica y cinemáticamente como el flujo en un canal abierto, y que por tanto su perfil de velocidades es aproximadamente una parábola. Sin embargo, en los cauces naturales la distribución de velocidades es muy diversa, debido a la presencia en el lecho de cantos rodados y arena, a la influencia de la fricción a los lados y en el fondo, y a la irregularidad de la sección. Pese a todo, en general el valor máximo de la velocidad se encuentra cerca a la superficie y el mínimo en el fondo, mientras que en las orillas normalmente se encuentra valores menores que en el centro de la corriente.

A lo largo del cauce del río, la velocidad también puede variar, dependiendo de la amplitud del cauce, pendiente, etc., y dado que la potencia extraída mediante una turbina de corriente libre es proporcional al cubo de la velocidad, la elección del lugar en la que ésta será colocada (y en el que se realizarán las mediciones) debe ser cuidadosa.

La velocidad que es necesario determinar para el dimensionamiento del sistema es la velocidad promedio de la corriente (v_M). Generalmente todas las mediciones incluyen la determinación de la velocidad superficial (v_s) como un paso previo para determinar el valor de v_M . En la siguiente figura puede verse la relación entre v_s y v_M . Adicionalmente se muestra la diferencia entre v_M y la velocidad promedio de una semisección ($v_{\frac{1}{2}}$). Por lo general puede asumirse sin error que la velocidad promedio de la semisección ($v_{\frac{1}{2}}$) ubicada al centro del río es aproximadamente igual a la velocidad promedio de la corriente ($v_{\frac{1}{2}} \approx v_M$). Mayores detalles serán dados posteriormente en la sección que describe la medición con flotadores (página 35).

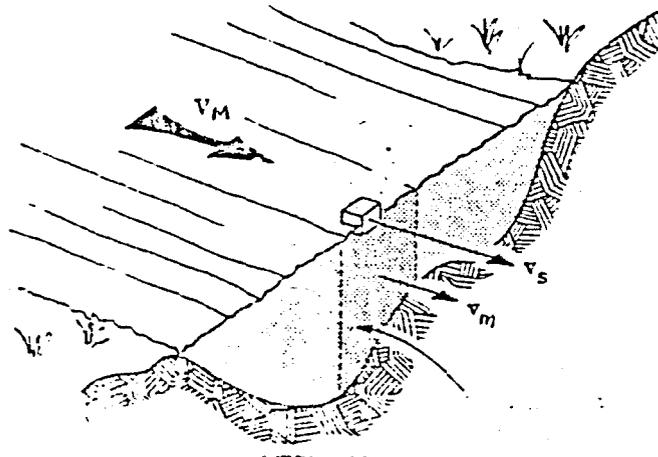


Figura 1.4 : Relación entre velocidad promedio y velocidad superficial de una corriente.
Fuente : Ref. [21].

A continuación se presentan diversos métodos para medir la velocidad de la corriente en un río, el orden en que vienen presentados guarda estrecha relación con el grado de precisión que se puede obtener aplicando cada uno de ellos.

i) Medición con correntómetro

Es el método más preciso utilizado para medir velocidades a cualquier profundidad de la corriente. Un correntómetro es un aparato que consiste de una hélice o una serie de copas montadas en un eje que gira libremente; la velocidad de rotación del eje es proporcional a la velocidad de la corriente en el punto en que éste se encuentra.

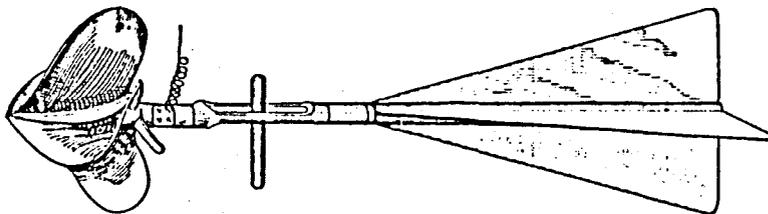


Figura 1.5 : Correntómetro tipo Haskell

Fuente : Ref. [22]

Por lo general los correntómetros incluyen un dispositivo que registra el número de revoluciones del eje; este dispositivo puede ser un simple contador mecánico de revoluciones (en el caso más simple) o un dispositivo que genera un impulso eléctrico cada cierto número de revoluciones y lo transmite a través de un cable a un contador digital en la superficie. El fabricante provee la relación entre el número de revoluciones y la velocidad de la corriente.

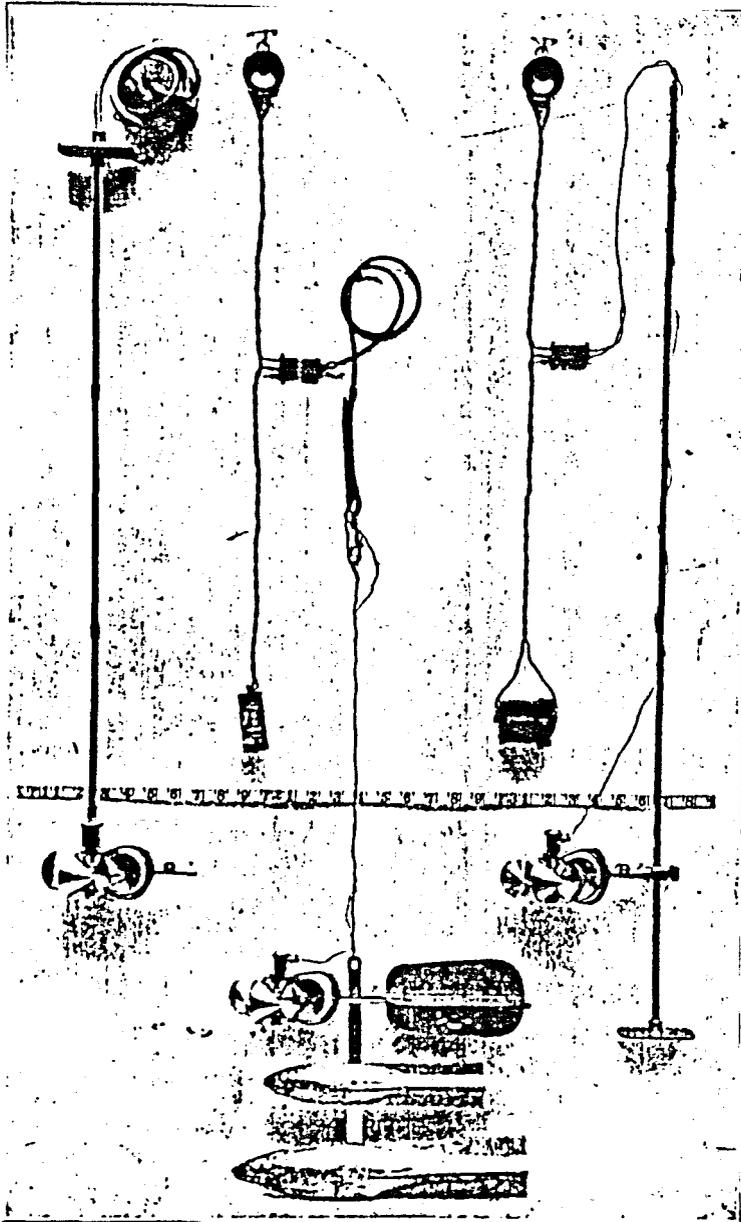


Figura 1.6 : Correntómetro tipo Price

Fuente : Ref. [23]

Los correntómetros son usados generalmente para medir velocidades en el rango 0,2-5 m/s, con un error en torno al 2% (ref. [24]). Pese a todo, debe indicarse que, aún si permiten obtener datos bastante precisos, su empleo viene limitado por tratarse de aparatos especiales y costosos.

Cuando se dispone de un correntómetro, y se desea determinar la velocidad promedio de la corriente (v_M), se utiliza uno de los métodos indicados a continuación. Generalmente estos métodos obtienen la velocidad promedio de la semisección en la que se realizan las mediciones. Para obtener la velocidad promedio del río, en forma suficientemente aproximada, las mediciones deberán realizarse al centro del río, como se ha indicado previamente. Mayores detalles serán dados posteriormente en la sección que describe la medición con flotadores (página 35).

a) Medición en varios puntos:

Se realizan mediciones en tres o más puntos en cada vertical y en varios puntos de la sección transversal de la corriente; los datos obtenidos permiten, si es necesario, dibujar líneas isótacas (de igual velocidad) y obtener la distribución de velocidades en toda la sección. Gracias a esto, se puede obtener la distribución de velocidades en cada vertical, y así determinar el punto de máxima velocidad de la corriente del río.

Para el cálculo de la velocidad promedio en una semisección, se utiliza la siguiente fórmula:

Por definición:

$$v_M = \left(\int_0^W v \, dw \right) / W \quad (1.6)$$

con:

- $v_{\bar{}}$: velocidad promedio de la corriente en la semisección
- v : velocidad de la corriente en el punto ubicado a una profundidad "w"
- w : profundidad de la corriente en un punto dado
- W : profundidad de la corriente en la semisección

Integrando con el método de Simpson, asumiendo que la velocidad es función de la profundidad y que esta función es de carácter parabólico, se obtiene:

$$v_{\bar{}} = (v_s + 3v_{0,2} + 2v_{0,6} + 3v_{0,8} + v_f) / 10 \quad (1.7)$$

En donde:

- $v_{\bar{}}$: Velocidad promedio de la corriente en la semisección
- v_s : Velocidad de la corriente en la superficie de la semisección (ver figura 1.4, página 27)
- v_x : Velocidad en un punto ubicado a "x" partes de la profundidad medidas desde la superficie
- v_f : Velocidad en el fondo

b) Medición del 0,2 y 0,8:

Se recomienda usar este método cuando existen datos para determinar el porcentaje de error que se obtendrá al utilizarlo. Generalmente esto implica haber realizado previamente un número grande de mediciones de la velocidad completas con el método anterior. En rios de poca pendiente el error máximo puede considerarse alrededor del 5 %, lo que constituye un valor aceptable para estos casos.

Este método se basa en el concepto de reemplazar la superficie de velocidad por un trapecio de área equivalente, luego, la velocidad media puede calcularse según:

$$v_m = (v_{0,2} + v_{0,8})/2 \quad (1.8)$$

En donde:

v_m : Velocidad media de la corriente en la semisección

v_x : Velocidad en un punto ubicado a "x" partes de la profundidad, medidos a partir de la superficie

c) Medición del 0,6 o método de un solo punto:

Para poder usarse con confiabilidad, debe existir la posibilidad de realizar el ajuste correspondiente con mediciones efectuadas con el método anterior. Se obtiene como velocidad media aquella ubicada al 60% de la profundidad medida desde la superficie. El error que se obtiene es mayor al 5%.

d) Medición por integración:

Es un método laborioso que normalmente se usa sólo para investigaciones. Consiste en realizar mediciones de la velocidad con un instrumento que asciende a velocidad constante desde el lecho del río. Luego se procede a la integración según la fórmula siguiente:

$$v_m = \frac{h}{W} \sum_{x=0}^h v_x (\Delta w) \quad (1.9)$$

Cuando el río es considerablemente ancho, puede ser más efectivo medir la velocidad de la corriente sólo en el punto donde estará ubicado el centro del rotor de la turbina de corriente libre (ref. [25]), en lugar de calcular la velocidad promedio de la corriente.

ii) Medición con molinetes

Por lo general, cuando no se dispone de un correntómetro, las mediciones de la velocidad (aforos) se llevan a cabo usando molinetes. Estos instrumentos son menos precisos y deberán ser calibrados con un instrumento de mayor precisión, como un correntómetro, al menos una vez al mes para obtener datos suficientemente precisos.

Los molinetes pueden ser de dos tipos, de casoletas (eje vertical) o de hélice (eje horizontal). Similarmente al correntómetro, los molinetes generan un impulso eléctrico que indica el número de revoluciones por segundo a los que giran, y que se registra en un contador digital.

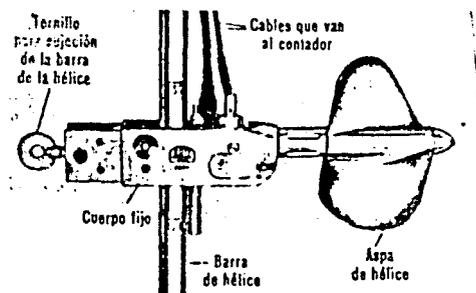


Figura 1.7 : Molinete o molinillo

Fuente : Ref. [26].

Posteriormente, mediante una simple relación lineal como la indicada a continuación, se determina la velocidad del flujo en ese punto.

$$v_i = aN + b \quad (1.10)$$

En donde:

v_i : velocidad de la corriente en el punto "i" (m/s)

N : número de revoluciones (rev./s)

a, b : constantes que dependen del instrumento

Para obtener resultados adecuados, se debe medir la velocidad de la corriente en uno o más puntos en cada vertical, con tiempos no mayores de un minuto entre ellas; el apoyo del molinete o instrumento orientado deberá ser orientado perpendicularmente a la dirección del flujo. Cuando esto no es posible, deberá tenerse en cuenta que el valor obtenido es la componente en esa dirección de la velocidad de la corriente, y que por tanto la velocidad de la corriente en ese punto será igual a:

$$v_i = v_i' / \cos \theta \quad (1.11)$$

En donde:

v_i : velocidad de la corriente en el punto "i" (m/s)

v_i' : velocidad de la corriente en el punto "i", medida por el instrumento

θ : ángulo que forma el instrumento con la dirección de la corriente

Cuando se emplean molinetes para medir la velocidad de un río suelen utilizarse los mismos métodos que vienen utilizados para las mediciones con correntómetro (ver sección anterior).

iii) Medición con flotadores

Cuando por diferentes motivos no se dispone de un correntómetro ni de molinetes o, debido al material de arrastre o a la elevada velocidad del río, no es posible utilizarlos, las mediciones no se realizan según los métodos indicados anteriormente. En estos casos suele usarse el método de la velocidad superficial o método de la medición con flotadores.

Este método es el más fácil de utilizar y entre sus ventajas está la de no requerir de equipo especial para realizar las mediciones. Pese a todo, este método no proporciona datos muy precisos cuando el lecho del río es de naturaleza irregular o el río es poco profundo.

El método consiste en medir la velocidad superficial del río o de una sección dada y luego, mediante un factor de corrección, calcular con cierta aproximación la velocidad media. Para esto, se escoge una parte del río en donde éste presente un ancho más o menos uniforme y recto, y en donde el agua fluya sin turbulencias ni obstáculos. En el punto en el que se quiere conocer la velocidad, se coloca un flotador y se mide el tiempo (t) que se demora en recorrer una distancia (L) previamente fijada, que se recomienda no sea menor de 50 m (ref. [27]); se recomienda que el objeto escogido sea parcialmente sumergido (como un trozo de leña o una botella parcialmente llena) de tal forma que no se vea afectado por el viento (ref. [28]). A continuación se calcula la velocidad superficial y la velocidad promedio en la semisección, según:

$$v_s = L/t \quad (\text{m/s}) \quad (1.12)$$

$$v_m = c v_s \quad (\text{m/s}) \quad (1.13)$$

En donde:

- v_m : velocidad de la corriente en la semisección
- v_s : velocidad de la corriente en la superficie de la semisección
- L : distancia que recorre el flotador (m)
- t : tiempo promedio obtenido de varias mediciones (s)
- c : factor de corrección que depende de la naturaleza del lecho del río. "c" varía entre 0,75 para ríos poco profundos y 0,95 para ríos profundos (ref. [29])

Si la medición se realiza cerca al centro del río, la velocidad promedio obtenida es aproximadamente la velocidad promedio de la corriente (v_M). En este caso, puede utilizarse la siguiente fórmula:

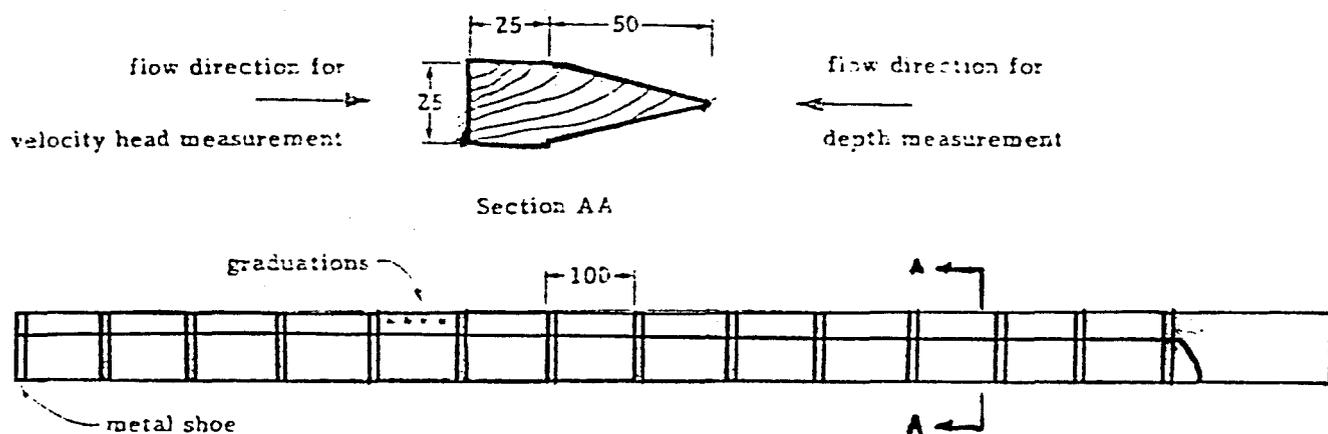
$$v_M = C v_s \quad (\text{m/s}) \quad (1.14)$$

El factor "C" varía entre 0,6 para lechos rocosos y 0,85 para lechos uniformes (ref. [30]), pero puede asumirse como 0,5 para ríos o canales con profundidad superior a 15 cm.

iv) Medición con bastón

El bastón medidor de velocidad sirve para medir la velocidad superficial de un río. Este dispositivo puede fácilmente determinar la velocidad superficial en cualquier punto a lo ancho del río. En flujo uniforme, el bastón puede ser fácilmente leído y arroja un error máximo de 3 % ; por el contrario, si el flujo es turbulento, el valor medido oscila de varios centímetros, y a pesar de todo el error no supera el 10% (ref. [31]).

Este dispositivo es particularmente útil en flujos que contienen material de arrastre o presentan características que pueden afectar otro tipo de mediciones. Se recomienda utilizarlo con flujos entre 0,3 y 3 m/s. La sección y dimensiones típicas de un bastón se muestran en la figura siguiente (Figura 1.8).



Glosario de términos:

Flow direction for velocity head measurement

(dirección del flujo para medición de la velocidad)

Flow direction for depth measurement

(dirección del flujo para la medición de la profundidad)

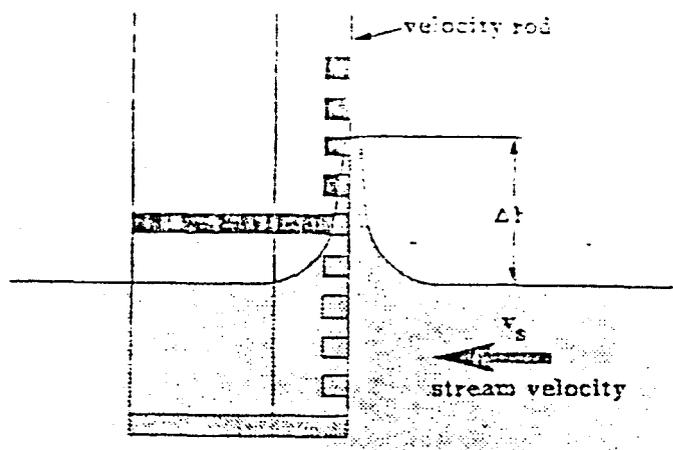
graduations (graduaciones)

metal shoe (pie metálico)

Figura 1.8: Sección y dimensiones de un bastón medidor

Fuente : Ref. [32].

El modo en que se utiliza este dispositivo es sumamente simple. Al momento de realizar la medición, se coloca el instrumento en posición vertical apoyado en el fondo del río, con el lado en forma de cuña en la dirección de la corriente, para así poder medir la profundidad. Posteriormente se gira el bastón (sin cambiarlo de posición) oponiendo a la corriente el lado recto, y se mide el incremento de elevación obtenido (ver Figura 1.9).



Glosario de términos :

velocity rod (bastón de velocidad)

stream velocity (velocidad de la corriente)

Figura 1.9: Uso del bastón medidor

Fuente : Ref. [33]

Este incremento (h) es igual a la presión dinámica ($v_s^2/2g$), puesto que el bastón medidor se comporta similarmente a un tubo de Pitot. Por tanto, la velocidad superficial puede determinarse según:

$$v_s = \sqrt{2g\Delta h} \quad (1.15)$$

Con :

v_s : velocidad superficial (m/s)

g : aceleración de la gravedad

Δh : incremento de altura (m)

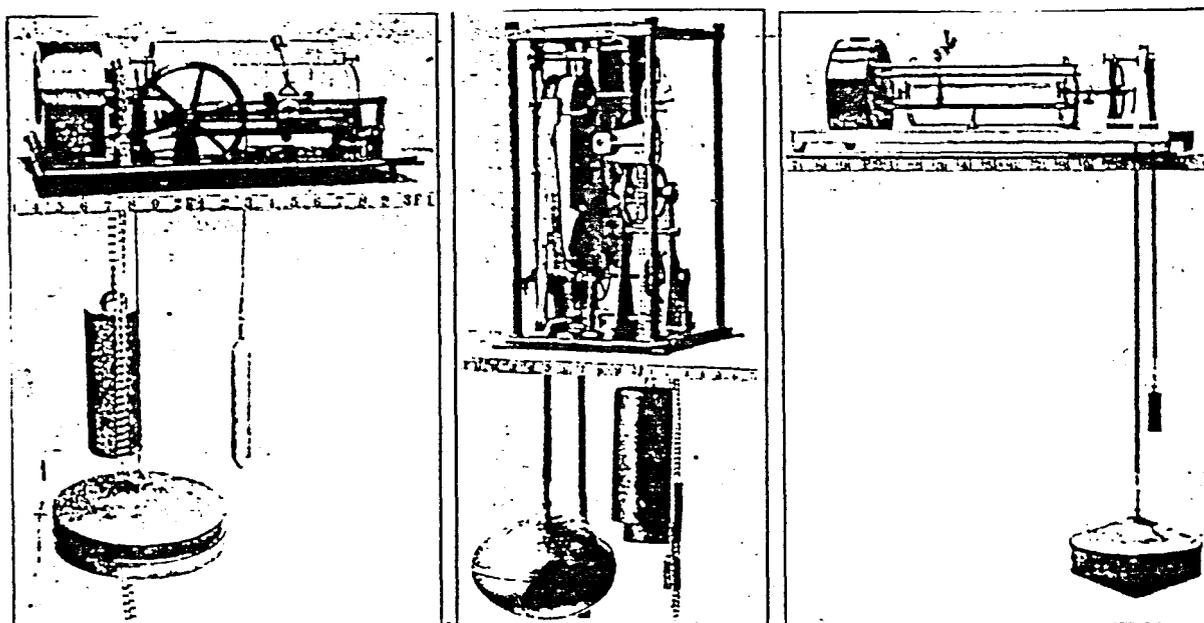
Como en la medición con flotadores, si la medición de la velocidad superficial se realiza en el centro del río, la velocidad promedio puede ser obtenida con la fórmula (1.14). En los demás casos, la velocidad promedio de la semisección se determina con la fórmula (1.13). Este método se utiliza sobre todo en cauces poco profundos.

1.4.3 Medición de la profundidad

El método empleado en la determinación de la profundidad, depende principalmente de las características del río. Cuando éste es pequeño, o se trata de un canal de derivación o similares, la medición se realiza gracias al uso de una barra graduada. Sin embargo, para ríos o flujos con características diversas, se suelen emplear los métodos indicados a continuación:

i) Escandallo o lastre coaxial

En este caso, el lastre lleva unido un cable o wincha, cuya verticalidad con respecto a la superficie y el fondo debe mantenerse durante el aforo. Si el ángulo entre el cable y la vertical es grande, es necesario entonces realizar correcciones en la profundidad medida. El peso del escandallo, "pescado", o lastre, es directamente proporcional a la velocidad, pues a mayor velocidad del río, el peso necesario para mantener el cable en posición vertical será mayor. Este método es usado principalmente para cauces poco profundos y de mucha velocidad.



a. Stevens.

b. Gurley Printing.

c. Friez.

Figura 1.10 : Escandallos para medir el nivel del río

Fuente : Ref. [34]

ii) Ecosonda

Se usa principalmente en ríos anchos y profundos. El amplificador magnético suele montarse en la propia sonda, y la profundidad se registra en una banda continua. Se recomienda calibrar la ecosonda con las mismas condiciones de salinidad y temperatura del agua donde se realizarán las mediciones.

REFERENCIAS

- [1] Haentjens y Maillard, ENERGIES RENOUVELABLES ET HYDRAULIQUE VILLAGEOISE DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT, Bruselas, Comission des Communautés Européennes, Direction Generale du Développement, 1985. p. 7.
- [2] IRC, ALTERNATIVE ENERGY SOURCES FOR DRINKING WATER SUPPLY IN DEVELOPING COUNTRIES, La Haya, International Reference Centre for Water Supply and Sanitation, 1983. p. 12.
- [3] Kristoferson, L. y Bokalders, V., RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: THEIR APPLICATIONS IN DEVELOPING COUNTRIES, Oxford, Pergamon Press Ltd., 1986. p.283.
- [4] Kenna, J. y Gillett, B., SOLAR WATER PUMPING: A HANDBOOK, Londres, I.T. Publications, 1985. p. 39.
- [5] Haentjens y Maillard, op. cit., p. 8.
- [6] Helvetas, MANUAL FOR RURAL WATER SUPPLY, WITH MANY DETAILED CONSTRUCTIONAL SCALE-DRAWINGS, St. Gall (Suiza), Swiss Centre for Appropriate Technology (SKAT), 1985. p. 34.
- [7] Fraenkel, P.L., WATER LIFTING DEVICES, FAO Irrigation and Drainage Paper 43, Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986. p. 30.
- [8] Kristoferson, L. y Vokalders, V., loc. cit.
- [9] Ibid.
- [10] Fraenkel, P., op. cit., p. 33.
- [11] Doorenbos, J. y Pruitt, W., LAS NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1983. p. 45.
- [12] Fraenkel, P., op. cit., p. 31.
- [13] Ibid.
- [14] Ibid., p. 34.
- [15] CEE, ELECTRIFICACION RURALE DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT, Bruselas, Comission des Communautés Européennes, Direction Generale du Développement, 1985. p. 16.
- [16] Fraenkel, P., op. cit., p. 29.
- [17] Ibid., p. 24. (corregido)
- [18] Hofkes, E.H. y Visscher, J.T., RENEWABLE ENERGY SOURCES FOR RURAL WATER SUPPLY, Technical Paper 23, La Haya,

International Reference Center for Community Water Supply and Sanitation, 1986. p. 116.

- [19] Ibid., p. 227.
- [20] Inversin, A., MICRO-HYDROPOWER SOURCEBOOK: A PRACTICAL GUIDE TO DESIGN AND IMPLEMENTATION IN DEVELOPING COUNTRIES, Washington D.C., NRECA International Foundation, 1986. p. 267.
- [21] Ibid, p. 13.
- [22] Powell, A., IRRIGATION ENGINEERING, Nueva York, John Wiley & Sons, Ltd., 1919, p. 155.
- [23] Ibid., p. 156.
- [24] Inversin, A., op. cit., p. 15.
- [25] Garman, P., WATER CURRENT TURBINES: A FIELDWORKER'S GUIDE, Londres, Intermediate Technology Publications, 1986. p.14.
- [26] Pürschel, W., TRATADO GENERAL DEL AGUA Y SU DISTRIBUCION, Tomo I : La Técnica de Aforo del Consumo de Aguas de Poblaciones (Parte Primera), Bilbao, URMO S.A. de ediciones, 1965. p. 14.
- [27] Ibid.
- [28] Inversin, A., loc. cit.
- [29] Ibid.
- [30] Ibid.
- [31] Ibid., p. 14.
- [32] Ibid.
- [33] Ibid.
- [34] Powell, A., op. cit., p. 160.



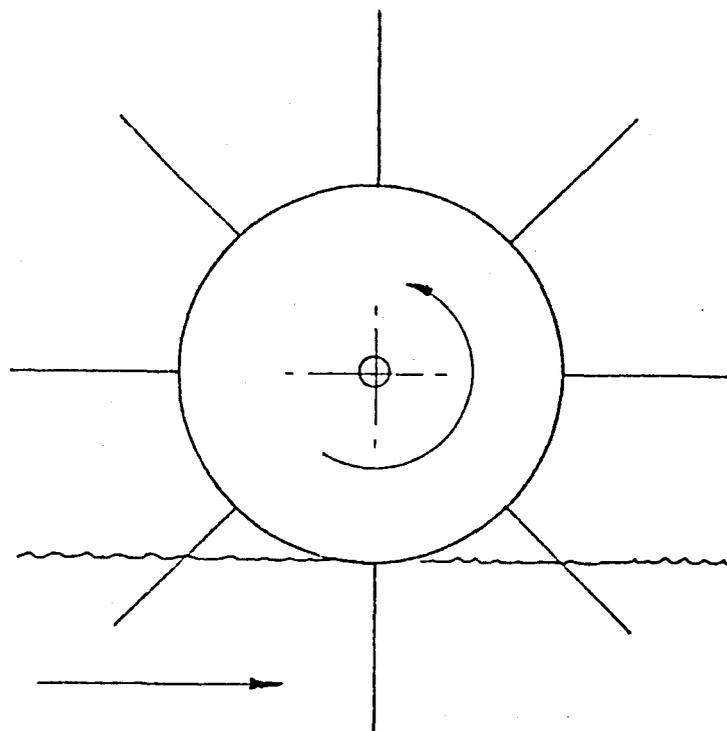
CAPITULO 2 : DESCRIPCION DEL SISTEMA PROPUESTO

2.1 Descripción de las Turbinas de Corriente Libre

Las turbinas de corriente libre son generalmente montadas en una plataforma flotante; el rotor puede estar sumergido en forma parcial o total, dependiendo del tipo de turbina, y rota gracias a la fuerza causada por la corriente. La potencia obtenida en el rotor es transmitida a la bomba por medio de un mecanismo de transmisión, generalmente engranajes, fajas o biela-manivela, el que puede multiplicar el número de revoluciones del eje hasta obtener aquél requerido para el bombeo eficiente.

La función del rotor de la turbina es la de convertir el máximo posible de la energía cinética que pasa a través de ella en energía útil al eje. Existen varios tipos de rotores que pueden utilizarse en turbinas de corriente libre, muchos de ellos similares los rotores usados para extraer energía del viento. De acuerdo al principio de funcionamiento, los rotores pueden clasificarse en:

1. Rotores cuyas superficies efectivas (álabes) se mueven siguiendo la dirección de la corriente, aprovechando la fuerza causada por el empuje del agua (es el caso de las ruedas hidráulicas golpeadas por abajo). Ver figura 2.1.



Rueda Hidráulica

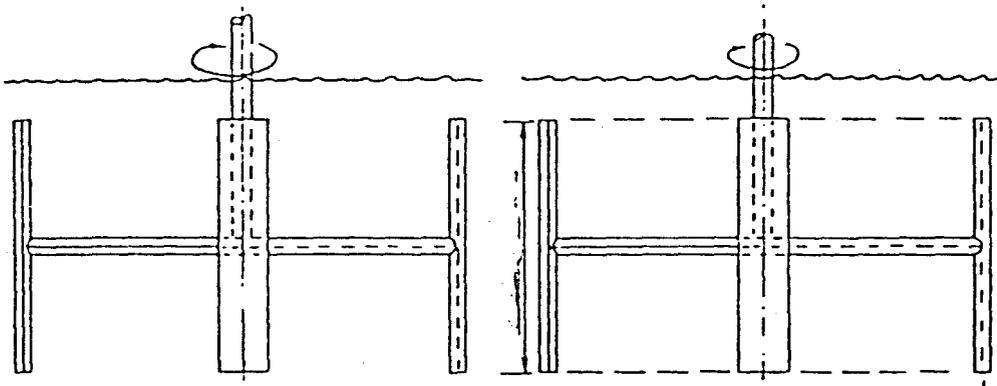
Número mínimo de paletas = 8

Figura 2.1 : Rueda hidráulica golpeada por abajo

Fuente: Ref. [1].

2. Rotores cuyas superficies efectivas se mueven formando un ángulo con la dirección del agua, aprovechando la fuerza de sustentación. Es el caso de los rotores Darrieus y Propeller. Ver figura 2.2.

a) Rotor Darrieus de eje vertical



b) Rotor Darrieus de eje horizontal

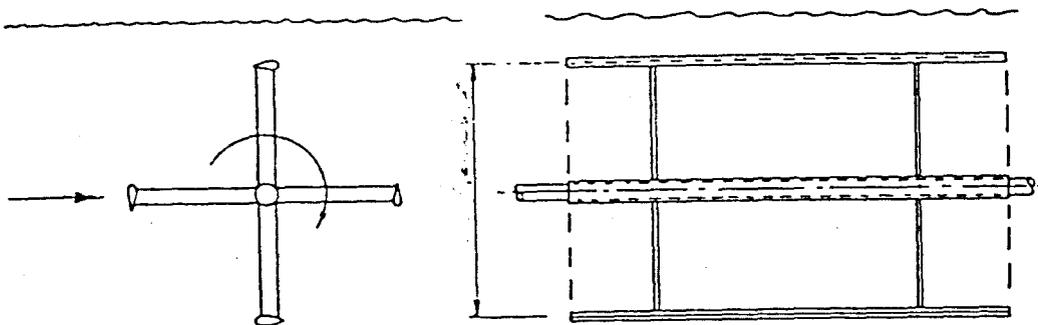
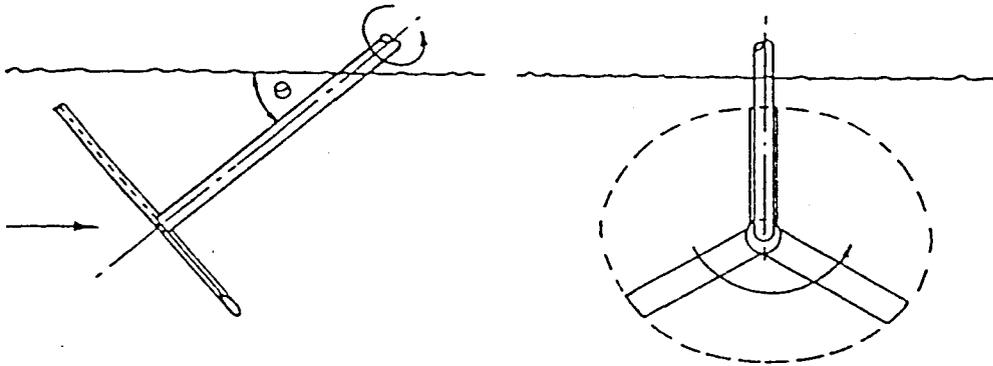


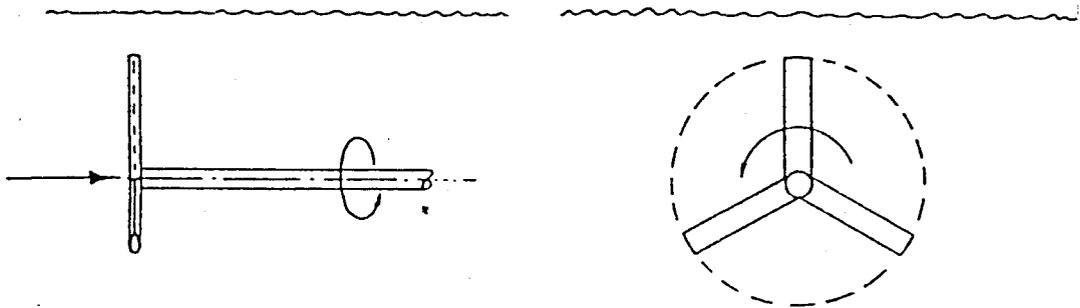
Figura 2.2 a) y b) : Rotores tipo Darrieus y Propeller

Fuente: Ref. [2].

c) Rotor Propeller de eje inclinado



d) Rotor Propeller de eje horizontal



e) Rotor Propeller arrastrado

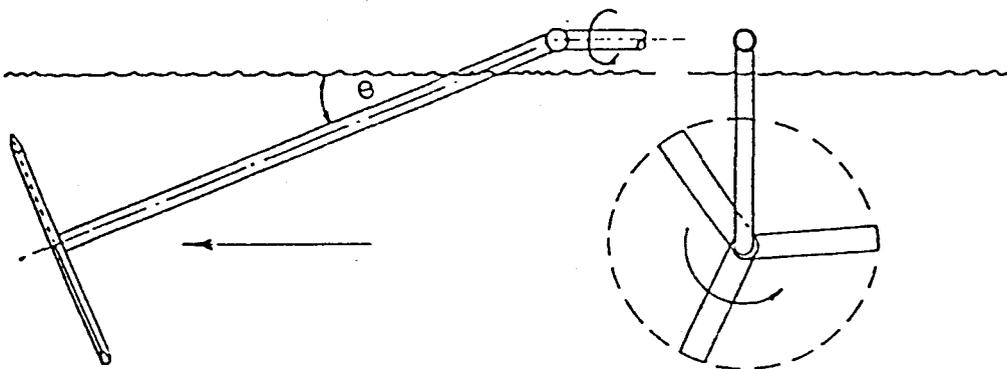


Figura 2.2 c), d) y e) : Rotores tipo Darrieus y Propeller

Fuente: Ref. [2].

f) Rotor Propeller sumergido a mitad

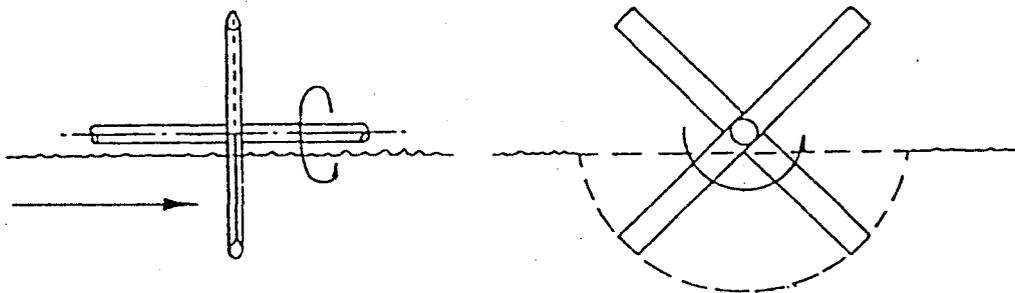


Figura 2.2 f) : Rotores tipo Darrieus y Propeller

Fuente: Ref. [2].

Diversos tipos de turbinas de corriente libre han sido diseñados basándose en los principios anteriores con el objeto de extraer la energía cinética de la corriente, pero sólo algunos de estos diseños han sido experimentados prácticamente. Entre los dispositivos propuestos, consideramos más pertinentes a la presente tesis los siguientes:

- La bomba tipo Plata.
- La turbina sumergida con conducto.
- La Riobomba de la Universidad de los Andes.
- La turbina del ITDG de rotor Darrieus de eje vertical.
- La turbina del ITDG de rotor Propeller de eje inclinado.

2.1.1 La bomba tipo Plata

La bomba Plata fue inventada en Nueva Zelanda y llegó a alcanzar la producción comercial aún si sólo a pequeña escala. En ella, pequeños rotores son montados en serie en un eje, a lo largo de un conducto cilíndrico de aproximadamente 2,5 m de largo por 0,5 de diámetro. Su funcionamiento es muy parecido al de una turbina tipo propeller, aún si no cuenta con estator ni difusores. El eje acciona directamente dos bombas de desplazamiento positivo de simple efecto. Para su funcionamiento, la bomba Plata requiere la construcción de un pequeño represamiento o vertedero, para crear un pequeño salto gracias al cual el agua fluye a través del ducto cilíndrico (Ver figura 2.3). Este dispositivo alcanza su mayor eficiencia cuando el ducto está lleno a $2/3$ ó $3/4$ de su capacidad, debido principalmente a que si el ducto está totalmente lleno, se produce rotación del fluido, lo que puede incluso detener el funcionamiento de los rotores.

Las bombas de este tipo han sido diseñadas para trabajar directamente en el río, pero es necesario crear un salto de 0,25 - 1,0 m, mediante el represamiento antes mencionado. La eficiencia lograda es del orden del 6-30 % con alturas de bombeo en el rango de 6 a 90 m, mientras que el costo era de aproximadamente 2000 dólares americanos en 1980 (ref. [3]).

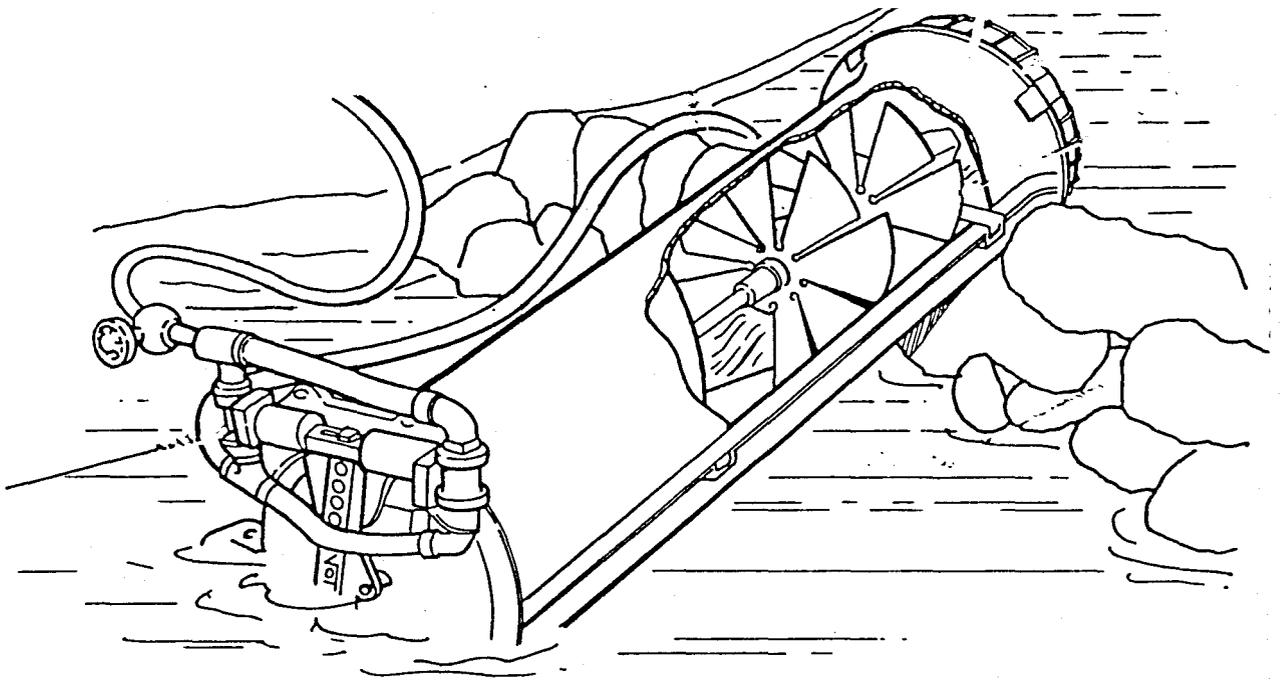


Figura 2.3: Bomba tipo Plata.

Fuente : Ref. [4].

2.1.2 La turbina sumergida con conducto

Este tipo de turbina es similar a una turbina tipo propeller, con la diferencia que la turbina y el conducto que sirve de estator se encuentran sumergidos. Este tipo de turbinas presenta dos grandes desventajas; la primera es que, dado que el salto es pequeño, requiere dimensiones muy grandes para producir la potencia suficiente para el bombeo de los volúmenes normalmente requeridos; en segundo lugar, este tipo de turbinas es propenso a sufrir daños durante las crecidas del río, las que pueden incluso dañarla gravemente (ref. [5]).

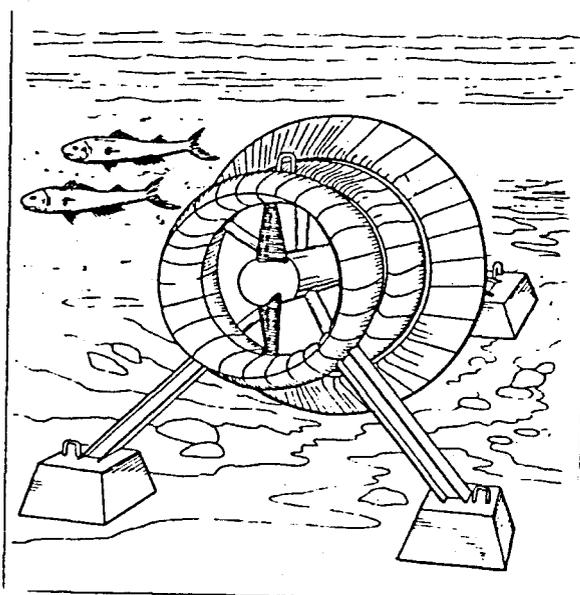


Figura 2.4: Turbina sumergida con conducto

Fuente: Ref. [6]

2.1.3 La Riobomba de la Universidad de los Andes (Colombia)

Un sistema de bombeo, conocido como Riobomba, ha sido desarrollado en Colombia para dotar de agua a comunidades ribereñas. La riobomba consiste en una turbina de corriente libre parcialmente sumergida, colocada en una balsa flotante y que extrae la energía cinética del río. La potencia en el eje sirve para accionar una bomba de desplazamiento positivo que eleva el agua desde el río hasta el nivel deseado (ref. [7]). Pruebas realizadas con este equipo dieron como resultado un caudal de 50 l/min con corrientes de 1 m/s, con una altura de bombeo de 8 m (ref. [8]).

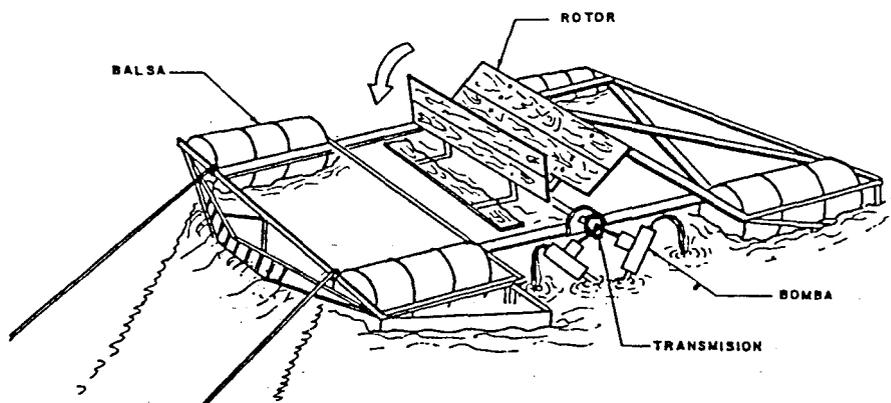


Figura 2.5: Riobomba de la Universidad de los Andes

Fuente: Ref. [9].

2.1.4 La turbina del ITDG de rotor Darrieus de eje vertical

La turbina de corriente libre que el Intermediate Technology Development Group (ITDG) de Inglaterra desarrolló y probó hacia fines de 1980, está formada por un rotor Darrieus de eje vertical, el cual se coloca suspendido en la corriente del río desde un puente flotante (ver figura 2.6). La potencia obtenida por el rotor es transmitida por medio de fajas a una pequeña bomba centrífuga, la cual manda el fluido a través de una tubería flexible a un tanque ubicado en la orilla más cercana del río.

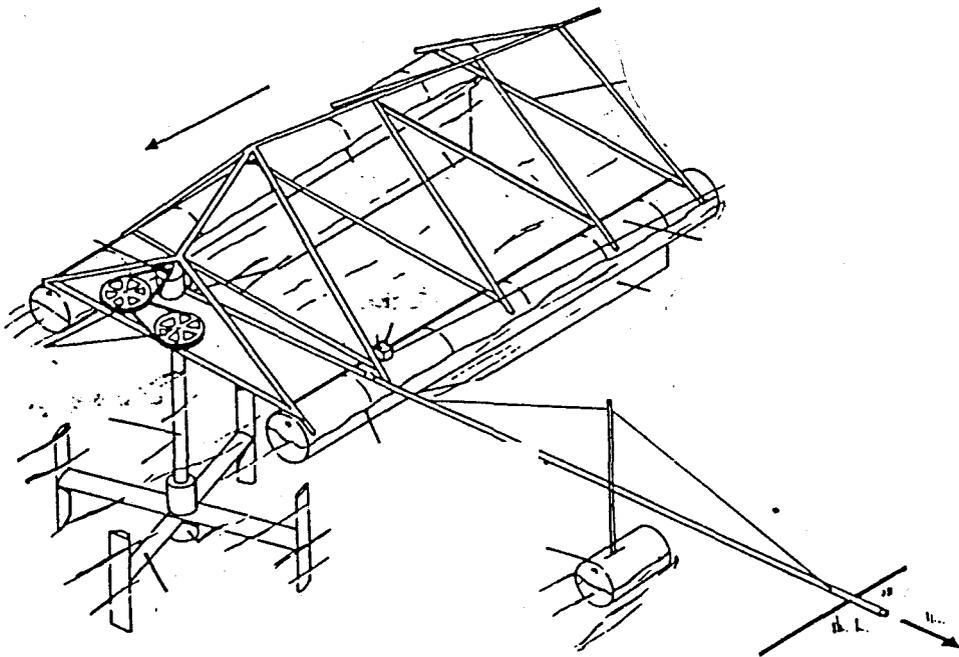


Figura 2.6 : Turbina Darrieus de eje vertical del ITDG

Fuente: Ref. [10].

Pruebas llevadas a cabo han demostrado que la bomba prototipo, con un rotor de 3 m de diámetro, trabajando en una corriente de 1 m/s puede bombear 1,67 l/s a una altura de 5 m. Los cálculos del diseño indican que la salida puede ser 5 l/s usando una corriente con una velocidad de 1,5 m/s. La eficiencia de este rotor es del orden del 25-30 %, dando una eficiencia total del sistema del 6 % (incluyendo pérdidas en las tuberías, bomba y transmisión) (ref. [11]). Por otro lado, el análisis de costos indicó que este mecanismo podía ser competitivo con las bombas diesel, especialmente en lugares en donde el combustible es escaso y caro.

2.1.5 La turbina del ITDG de rotor Propeller de eje inclinado

Los estudios realizados con el anterior prototipo, llevaron a que la misma institución probara, hacia 1982, nuevos tipos de turbinas de corriente libre. Luego de casi dos años de pruebas, dos sistemas de bombeo que utilizan rotores de tipo propeller con eje inclinado fueron considerados suficientemente eficientes para comenzar la difusión comercial; ambos son conectados a bombas centrífugas utilizando medios de transmisión como fajas o cadenas.

Los dos sistemas pueden bombear agua a gran altura, pero con caudales reducidos. El primero de ellos, con un rotor de 5 metros cuadrados, bombea como máximo 24 metros cúbicos por hora a una altura de 5 metros; el otro, con un área de 3,75 m², bombea 6 metros cúbicos por hora considerando la misma altura de bombeo. El sistema que usa el primer tipo de rotor tenía un costo, en 1982, de 5000 dólares americanos, mientras que el segundo sistema costaba 2000 dólares de los E.E.U.U. (ref. [12]).

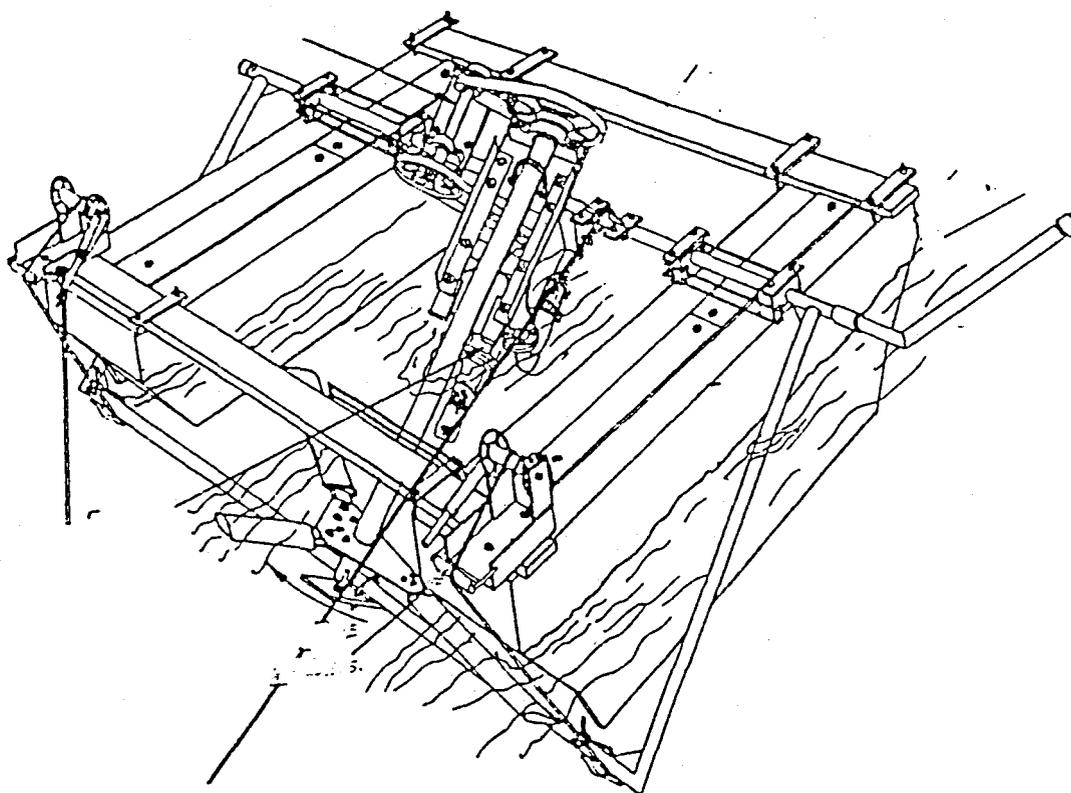


Figura 2.7: Turbina Propeller de eje inclinado del ITDG

Fuente : Ref. [13].

2.2 Descripción del Sistema Propuesto

2.2.1 Selección y descripción de la turbina

Las experiencias llevadas a cabo con los diferentes tipos de rotores han permitido establecer las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Los principales criterios que permiten evaluar la factibilidad de cada rotor se presentan en manera resumida en la tabla siguiente. En ésta, el puntaje señalado es de 0 a 10; "0" significa que, según la fuente de la información, el diseño presenta problemas tecnológicos aún no resueltos, mientras que "1" significa que el sistema tiene muy baja eficiencia. Una velocidad de rotación alta (criterio (g)) puede ser importante para reducir el costo y la complejidad de la transmisión, en el caso en que se quiera utilizar una bomba centrífuga.

TABLA 2.1 : COMPARACION ENTRE ROTORES
(ver figuras 2.1 y 2.2)

Tipo de rotor	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	Comentarios
Rueda hidráulica flotante	1	1	9	9	8	10	1	Gran cantidad de material requerido por kW.
Darrieus eje vertical	5	5	2	8	10	6	6	Ideal para máquinas de más de 1 kW.
Darrieus eje los horizontal	4	10	3	8	0	0	8	Problemas en rodajes y en la utilización de la energía.
Propeller eje inclinado	7	7	6	6	9	6	6	Al momento es la mejor alternativa para máquinas de menos de 1 kW
Propeller eje horizontal	7	9	6	4	0	0	8	Problemas similares al rotor Darrieus.
Propeller arrastrado	8	8	6	5	8	6	7	Apto para máquinas de menos de 1 kW.
Propeller sumergido a mitad	8	6	6	8	8	6	1	Bajo coeficiente de performance debido al salpicar del agua.

- (a) Costo de materiales, incluyendo estructura de apoyo.
- (b) Velocidad de rotación.
- (c) Facilidad de construcción.
- (d) Conveniencia para ríos poco profundos.
- (e) Posición del eje para facilitar el empleo de una bomba.
- (f) Posición de los rodajes.
- (g) Capacidad de funcionar a pesar de desechos flotantes en el río.

Fuente: Ref. [14].

La tabla anterior permite notar que, para máquinas por debajo de 1 kW de potencia al eje, los rotores más adecuados son el rotor tipo propeller de eje horizontal, el de eje inclinado y el rotor propeller arrastrado.

El rotor propeller de eje horizontal podría constituir una buena alternativa para el sistema de bombeo, pero las experiencias realizadas hasta ahora con rotores de eje horizontal sumergido, han encontrado problemas en los rodamientos en los que se apoya el eje. En efecto, el eje de estos rotores generalmente se apoya en dos puntos de la estructura, y al menos uno de los rodamientos que allí se encuentran debe ser capaz de soportar las cargas axiales debido a la flexión, mientras que ambos deben permitir algo de desalineamiento para compensar las tolerancias de fabricación; esto es casi imposible de lograr con ambos extremos del eje sumergidos. Por tanto, aún si el rotor será menos eficiente (pues aprovechará sólo la componente de la velocidad en la dirección del eje), es preferible que uno de los extremos del eje esté fuera del agua, lo que se logra inclinando el eje para colocar allí un rodamiento que soporte cargas axiales, sea autoalineante y permita una adecuada lubricación. El otro extremo del eje estará sumergido y por tanto usará un rodamiento simple lubricado con agua.

Otra posibilidad sería la de un sistema que use un rotor propeller del tipo arrastrado, el que podría tener costos menores (ref. [15]), especialmente en lugares donde la turbina puede ser colocada a una distancia no mayor de 15 m de la orilla, lo que haría posible un fácil mantenimiento desde ésta. Tal sistema no ha sido probado aún, pero al menos desde el punto de vista del diseño es muy similar al rotor propeller de eje inclinado. Por estas razones, el rotor tipo propeller con eje inclinado es el rotor que puede ser considerado como el más apto para máquinas de hasta 1 kW de potencia.

El tipo de rotor propuesto en el presente tema de tesis, es un rotor de tipo propeller con eje inclinado, el cual puede considerarse sustancialmente similar al rotor descrito en la sección 2.1.5, pero a diferencia de éste, el sistema propuesto en el presente trabajo será diseñado para simplificar al máximo la construcción y el número de elementos del sistema. Por tanto, se preferirá utilizar un sistema multipalas, el cual será más lento, pero más simple de construir, y con menores cargas dinámicas.

2.2.2 Selección y descripción de la bomba

Existen básicamente dos tipos de bombas que pueden ser utilizadas en este tipo de sistemas de bombeo: a) bombas rotodinámicas, como las bombas centrífugas, y b) bombas de desplazamiento positivo, como las bombas de pistón.

La tabla de la página siguiente resume las ventajas y desventajas de estos dos tipos de bombas, dando una idea de su aplicabilidad a las turbinas de corriente libre.

TABLA 2.3 : COMPARACION ENTRE DIVERSOS TIPOS DE BOMBAS

Tipo	Ventajas	Desventajas
Bombas de pistón	<p>Velocidad de operación baja</p> <p>Eficiencia casi independiente de la altura de bombeo</p> <p>Diseño simple y construcción sencilla</p> <p>Ideal para grandes alturas de bombeo</p> <p>Descarga relativamente constante a pesar de variaciones en la altura de bombeo</p>	<p>Componentes sujetos a fricción</p> <p>Necesidad regular de mantenimiento y cambio de repuestos</p> <p>Partes sujetas a vibración</p> <p>Descarga discontinua</p> <p>Necesidad de mayor número de válvulas</p> <p>Necesitan un torque de arranque alto</p> <p>Operación ruidosa</p>
Bombas centrífugas	<p>Operación continua</p> <p>Amplio rango de capacidades</p> <p>Eficientes a grandes volúmenes de bombeo</p> <p>Descarga continua</p> <p>Bajo torque de arranque</p>	<p>Alta velocidad de rotación y por tanto, necesidad de transmisión</p> <p>El mantenimiento y las reparaciones requieren personal calificado</p> <p>El caudal y la eficiencia son fuertemente afectados por la altura de bombeo</p> <p>Operación satisfactoria cuando trabajan a condiciones de diseño</p>

Fuente : Ref. [16], [17], [18].

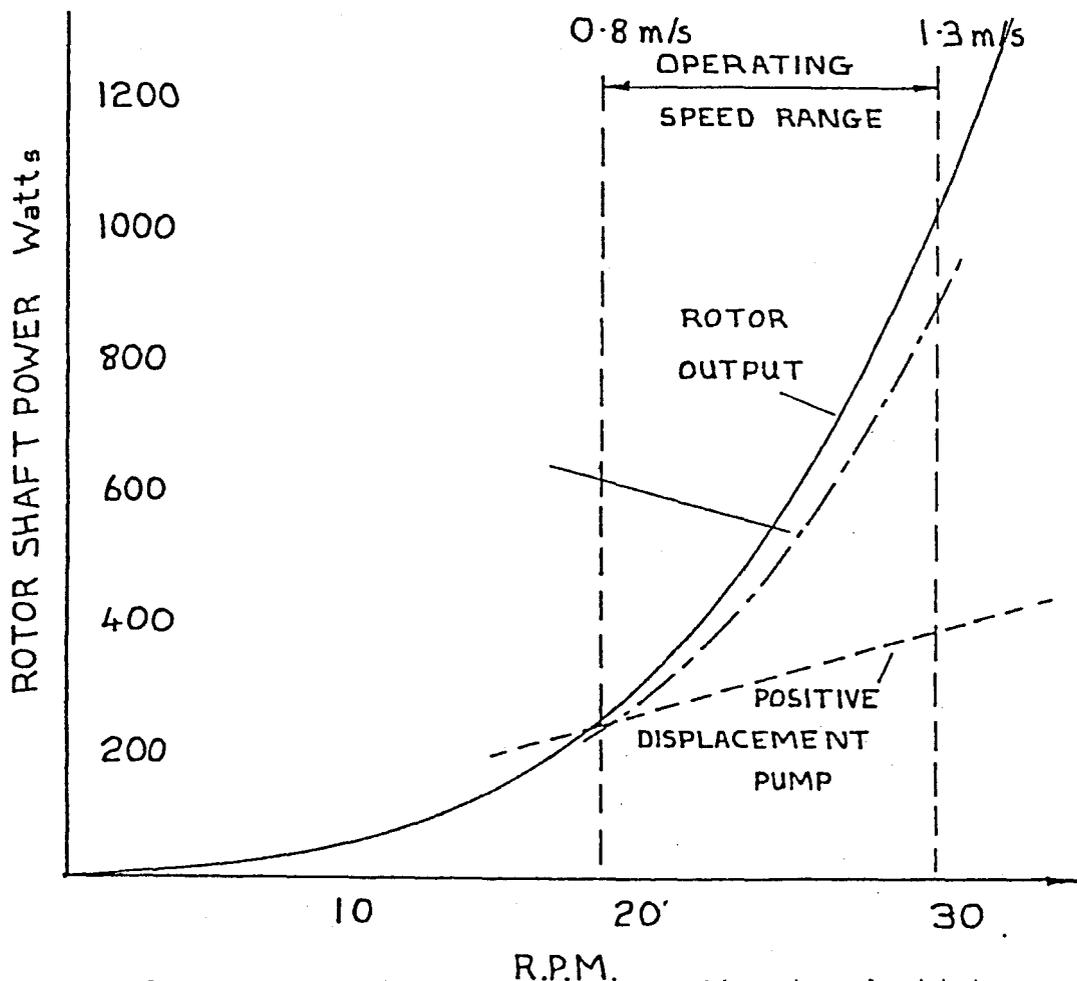
Teniendo en cuenta que la turbina que será diseñada como parte de este trabajo será una turbina multipalpas, las bombas de desplazamiento positivo, y en particular las bombas de pistón, son las que mejor se acomodan a su funcionamiento.

Esta elección se hace principalmente dadas sus numerosas ventajas (resumidas en la tabla anterior), pero sobre todo porque mantienen la eficiencia y el torque constante aún cuando trabajan en diferentes puntos de operación. En efecto, a pesar que las bombas centrífugas aprovechan mejor la energía, en ellas el caudal de salida varía cuando varía la velocidad del rotor (es decir, de la corriente). Lo mismo sucede con las bombas de desplazamiento positivo, pero éstas conservan su eficiencia en el rango de velocidades del rotor; por otra parte, las posibles variaciones en el caudal de salida son de poca consideración.

La mayor desventaja de utilizar bombas de pistón es que requieren un torque alto para arrancar. En efecto, las bombas centrífugas tienen como ventaja que requieren un bajo torque de arranque y que si el torque no es suficiente para empezar a bombear, giran en vacío. Las bombas de pistón, por el contrario, requieren un torque mayor para arrancar, dado que el pistón necesita energía para vencer la fricción con las paredes del cilindro y la presión de la columna de agua en la tubería de descarga, y además el torque se mantiene medianamente constante durante el resto del funcionamiento. A pesar de esto es más conveniente utilizar una bomba de desplazamiento positivo pues una turbina de corriente libre multipalas provee, al igual que los molinos de viento, un alto torque inicial, el que seguramente será suficiente para arrancar una bomba de desplazamiento positivo adecuadamente dimensionada. Por otro lado, las características de la corriente de un río, a diferencia del viento, presentan menos variaciones durante la jornada, garantizando un funcionamiento continuo.

Debe indicarse además que una bomba de pistón requiere un número de revoluciones bajo, por lo que podrá ser acoplada directamente a la turbina, sin necesidad de costosas transmisiones, las que sí serían indispensables para accionar un bomba centrífuga.

Pese a todo, debe tenerse en cuenta que la energía absorbida por las bombas de pistón varía proporcionalmente con el número de golpes por minuto, (es decir el número de revoluciones y por tanto la velocidad de la corriente), por lo que, si la bomba es correctamente acoplada con la turbina en el punto más bajo de su rango de operación (con velocidad de la corriente menor), una gran parte de la energía disponible de la turbina será desperdiciada en el extremo superior del rango, pues será energía que no puede ser utilizada, a menos que cada vez que varía la velocidad del río la bomba sea nuevamente acoplada idealmente, lo cual es imposible (ver Figura 2.8).



Glosario: Operating speed range: rango operativo de velocidades
 Rotor output : potencia de salida del rotor
 Positive displacement pump : bomba de desplazamiento positivo
 Rotor shaft power : potencia en el eje del rotor

Figura 2.8: Comportamiento de una turbina de corriente libre y una bomba de pistón (con C_p constante)

Fuente: Ref. [19].

Uno de los factores que deberá tomarse en cuenta para la fabricación del sistema, es que las bombas de desplazamiento positivo tienen descarga intermitente y envían el fluido acelerándolo y desacelerándolo en las tuberías; por este motivo, para reducir las pérdidas de fricción, es necesario colocar un pozo piezométrico a la salida de la bomba para mantener continuo el flujo en las tuberías y evitar fenómenos de golpe de ariete. Por otra parte, el sistema presentará mejores cualidades cuando se tratará de bombear pequeños caudales a grandes alturas de bombeo.

REFERENCIAS

- [1] Garman, P., WATER CURRENT TURBINES: A FIELDWORKER'S GUIDE, Londres, Intermediate Technology Publications Ltd., 1986. p. 19.
- [2] Ibid., p. 21-22.
- [3] Collett, J., "Hydropowered Water Lifting Devices for Irrigation", PROCEEDINGS OF THE FAO/DANIDA WORKSHOP ON WATER LIFTING DEVICES IN ASIA AND THE NEAR EAST, BANGKOK, 1979, Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1980. pp. 47-52.
- [4] Fraenkel, P., WATER LIFTING DEVICES, FAO Irrigation and Drainage Paper, N° 43, Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1986. p. 244.
- [5] Radkey, R., Lissaman, P. B. S. y Catherasoo, C. J., "Run of River Ducted Turbines: A minimum system for the ultra low head resource", PROCEEDINGS OF THE WATER POWER 1981 CONFERENCE, Washington D.C., 1981. pp. 20-24.
- [6] Leyland, B. W., "Equipment for Small Hydro Schemes: A Review of Progress", WATER POWER & DAM CONSTRUCTION, Volumen 39, Número 4, Surrey, Reed Business Publishing, 1987. p. 20.
- [7] Mayroca, E., "Riobomba: Una alternativa de riego para zonas rurales", INFORMACION TECNOLOGICA, Año 3, número 9, Lima, Itintec, 1986. pp.14-16.
- [8] Lobo Guerrero, J., DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT CURRENT WATER WHEEL, Bogotá, Universidad de los Andes, 1985. p. 12.
- [9] Ibid.
- [10] Fraenkel, P., op. cit., p. 246.
- [11] Ibid., pp. 246-247.
- [12] Garman, P., op. cit., p. 2.
- [13] Ibid., p. 18.
- [14] Ibid., p. 8.
- [15] Ibid., p. 23.

- [16] Hofkes, E. H. y Visscher, J.T., RENEWABLE ENERGY SOURCES FOR RURAL WATER SUPPLY, Technical Paper 23, La Haya, International Reference Center for Community Water Supply and Sanitation, 1986. pp. 62-63.
- [17] Lysen, E. H., INTRODUCTION TO WIND ENERGY, Segunda Edición, Amersfoort (Holanda), Consultancy Services Wind Energy Developing Countries, 1983. p. 100.
- [18] Garman, P., op. cit., pp. 30-33.
- [19] Ibid., p. 34.

CAPITULO 3 : ANALISIS ENERGETICO

3.1 Generalidades

El análisis energético del sistema propuesto comprende el estudio de las relaciones necesarias para la determinación de las características geométricas del sistema y su dimensionamiento. Se presentará la metodología para determinar la potencia necesaria para el sistema y la energía disponible en una corriente libre. Gracias al empleo de estos datos y de fórmulas teóricas y datos experimentales, se indicará finalmente la metodología para el dimensionamiento del sistema (turbina y bomba).

3.2 Ecuaciones del sistema

A continuación se presentarán las ecuaciones que se utilizarán para el cálculo de la potencia necesaria para el bombeo y la

determinación de la potencia disponible debido a la corriente del río. Estas ecuaciones serán el punto de partida para el dimensionamiento del rotor y, posteriormente, de los demás elementos del sistema de bombeo.

3.2.1 Potencia necesaria para el bombeo

La potencia requerida para bombear agua es determinada por la cantidad de agua que debe ser bombeada (Q), la altura a la que debe ser elevada (H) y la eficiencia total del sistema de bombeo (ver pag. 72). La potencia requerida es proporcional a los dos primeros factores, e inversamente proporcional a la eficiencia. La energía requerida por segundo, que es la potencia requerida para el bombeo, puede ser calculada con la siguiente ecuación (fórmula 1.3):

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / \eta_r \quad (1.3)$$

En donde:

P : potencia hidráulica necesaria para el bombeo (W)

ρ : densidad del agua (kg/m^3)

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

Q : caudal de salida (m^3/s)

H : altura total de bombeo (m)

η_r : eficiencia total del sistema (%)

Los datos necesarios para determinar el caudal de salida necesario, se determinan de acuerdo al procedimiento indicado previamente en el primer capítulo (ver sección 1.2, requerimientos de potencia para el bombeo).

3.2.2 Energía disponible en un flujo libre

El flujo de energía cinética (o potencia cinética) disponible en una corriente de agua puede ser calculada gracias a la siguiente fórmula:

$$P_c = \dot{m} \cdot v^2 / 2 \quad (3.1)$$

Con: P_c : potencia cinética (W)

• \dot{m} : flujo de masa (kg/s)

v : velocidad del agua (m/s).

Usando: $\dot{m} = \rho \cdot A_p \cdot v_0 \quad (3.2)$

Con: \dot{m} : flujo de masa (kg/s)

ρ : densidad del agua (1000 kg/m³)

A_p : área del rotor perpendicular a la dirección de la corriente de la que se extrae la potencia (m²). Ver Figura 3.1.

v_0 : velocidad media del agua antes de la sección A_p (m/s)

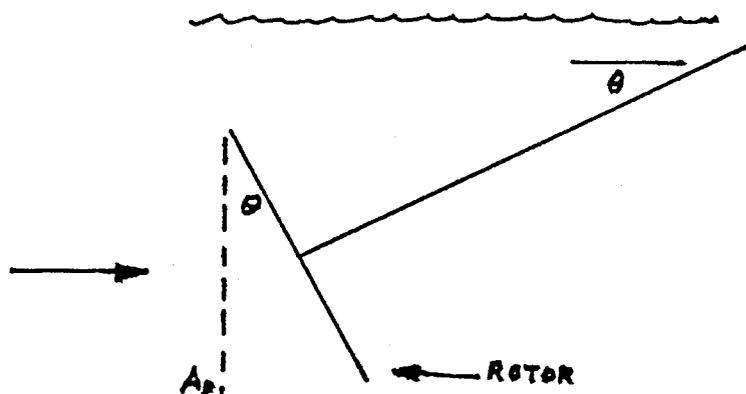


Figura 3.1 : Área del rotor perpendicular a la dirección de la corriente

Es decir, el flujo de agua que atraviesa un área A_p con una velocidad v_0 , se obtiene:

$$P_c = 0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot v_0^3 \quad (3.3)$$

En donde:

P_c : potencia cinética disponible (W)

ρ : densidad del agua (1000 kg/m³)

A_p : área del rotor perpendicular a la dirección de la corriente de la que se extrae la potencia (m²)

v_0 : velocidad media del agua antes de la sección A_p (m/s)

De la ecuación anterior, se puede obtener la siguiente tabla, en la que se da la densidad de potencia (kW/m²) de una corriente en función de su velocidad:

Velocidad		Densidad de Potencia
(m/s)	(nudos)	(kW/m ²)
0,5	1,0	0,06
1,0	2,0	0,50
1,5	3,0	1,70
2,0	4,0	4,00

Fuente : Ref. [1].

En la práctica, no es posible extraer toda la potencia de una corriente, por dos razones; la primera, porque extraer toda la energía cinética significaría detener el río, lo cual, lógicamente, no es posible, y la segunda, porque la conversión de energía implica siempre pérdidas. Por tanto, la potencia que un rotor puede extraer de una corriente de agua es sólo una parte de la potencia cinética; esta

parte se determina con el coeficiente de potencia (C_p). La ecuación anterior resulta entonces:

$$P_e = 0,5 \rho \cdot A_p \cdot v_0^3 \cdot C_p \quad (3.4)$$

En donde:

P_e : potencia en el eje (W)

ρ : densidad del agua (1000 kg/m³)

A_p : área del rotor perpendicular a la dirección de la corriente de la que se extrae la potencia (m²)

v_0 : velocidad media del agua medida al menos a una distancia igual a dos veces el diámetro del rotor aguas arriba del rotor (m/s)

C_p : coeficiente de potencia del rotor

El máximo coeficiente de potencia que se puede lograr teóricamente es conocido como límite de Betz, y es igual a 16/27 (0,593) (ref. [2]). Experimentalmente se ha probado que, bajo típicas condiciones de operación y manufactura, el coeficiente de potencia para rotores del tipo propeller y Darrieus es del orden de 0,2-0,25, dependiendo de la velocidad de la corriente y la calidad de manufactura alcanzada (ref. [3]). C_p depende del tipo de álabe y de la velocidad de rotación del rotor y varía con la velocidad de la corriente. El rotor deberá ser diseñado en modo que C_p tenga su valor máximo a la velocidad de diseño (que no es la velocidad promedio sino la velocidad prevalente de la corriente). Un rotor diseñado con una velocidad de diseño relativamente baja no tendrá dificultades para arrancar a bajas velocidades de la corriente, pero su eficiencia será menor cuando éstas sean altas.

3.3 Diseño del Rotor

El diseño del rotor consiste en determinar las características geométricas y cinemáticas del rotor y de los álabes que lo forman. En este sentido, como primer paso se determinan la geometría básica del rotor (radio, número de álabes, velocidad de rotación y tipo de álabes) y a continuación las características geométricas del álabe (ángulo de setting o ángulo del álabe y longitud de la cuerda en diferentes puntos) que permiten su fabricación.

3.3.1 Geometría básica del rotor

Los parámetros del rotor que deben ser determinados inicialmente son: el radio del rotor, la velocidad relativa de rotación, el número de álabes y el tipo de álabes.

i) Determinación del radio

El radio del rotor se calcula en función de la energía que se requiere para las condiciones de diseño. Generalmente se asume como condiciones de diseño aquellas del mes crítico, cuando la relación entre energía requerida y energía disponible de la corriente es mayor. Para establecer estas condiciones se debe tabular adecuadamente los datos de las necesidades brutas de energía en base mensual o quincenal (teniendo en cuenta las variaciones en la altura de bombeo y caudal requerido) y compararlas con la energía disponible del río, la cual, como se ha visto, está determinada por la velocidad de la corriente. Adicionalmente, se debe también considerar la profundidad mínima del río, el que es un factor gravitante para la determinación del radio máximo del rotor.

Para la determinación del radio del rotor, se procede igualando, para el mes de diseño, la energía requerida con la energía disponible del río.

Usando la fórmula (1.5) dada en el primer capítulo, para las condiciones de diseño:

$$P = \rho \cdot V_d \cdot H_d \cdot g / 86400 \cdot \eta \quad (1.5)$$

En donde :

P : potencia requerida en el eje del sistema (W)

ρ : densidad del agua (kg/m^3)

V_d : volumen de diseño del agua que debe ser provisto ($\text{m}^3/\text{día}$)

H_d : altura de bombeo de diseño (m)

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

η : eficiencia del sistema, sin incluir el rotor (%)

E, igualándola a la fórmula (3.4), se obtiene:

$$P = \rho \cdot V_d \cdot H_d \cdot g / (86400 \cdot \eta) = 0,5 \cdot \rho \cdot \beta \cdot v_0^3 \cdot C_p$$

Es decir:

$$\beta = V_d \cdot H_d \cdot g / (43200 \cdot v_0^3 \cdot C_p \cdot \eta) \quad (3.5)$$

Introduciendo el concepto de eficiencia total, es decir:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{rotor}} \cdot \eta_{\text{transmisión}} \cdot \eta_{\text{bomba}} \cdot \eta_{\text{conducción}}$$

Con:

η_{rotor} : eficiencia del rotor (C_p)

$\eta_{\text{transmisión}}$: eficiencia de la transmisión

- η bomba : eficiencia de la bomba, incluyendo pérdidas mecánicas, hidráulicas y volumétricas.
- η conducción : eficiencia de conducción, incluyendo pérdidas en las tuberías, en el sistema de distribución y en el sistema de aplicación.

y haciendo $A_p = \pi R^2 \cos \theta$, en donde θ es el ángulo de inclinación del eje del rotor con respecto al nivel horizontal, y reemplazando en la ecuación (3.5), se obtiene:

$$R = \sqrt{V_0 \cdot H_0 \cdot g / (43200 \cdot \pi \cdot \cos \theta \cdot v_0^3 \cdot \eta_{\text{total}})} \quad (3.6)$$

En la tabla dada a continuación se presentan valores típicos de las eficiencias de los diferentes elementos del sistema. Pese a todo, para un adecuado dimensionamiento del rotor se debe calcular con la mayor precisión posible la eficiencia total del sistema, de acuerdo a los datos presentados en el primer capítulo de este trabajo. Como primera aproximación pueden utilizarse los datos presentados en la Tabla 3.2.

TABLA 3.2: EFICIENCIAS TÍPICAS

Rotor	0,25
Transmisión	0,80
Bomba (de pistón)	0,45
Sistema de distribución	0,80
Eficiencia Total	0,07

Fuente : Ref. [4].

Por tanto, en la ecuación (3.6) podemos reemplazar la η_{total} que se puede considerar igual a 0,07, g (9.8 m/s²) y π , con lo que se obtiene:

$$R = \sqrt{V_d \cdot H_d / (969 \cdot v_0^3 \cdot \cos \theta)} \quad (3.7)$$

A partir de esta ecuación es posible determinar el diámetro de la turbina en función de la velocidad de la corriente. En este modo, se puede establecer también la corriente mínima y la profundidad mínima. Generalmente se estima que la velocidad mínima para este tipo de turbinas es del orden de 0,8 m/s, y la profundidad mínima 1,8 m para extraer la energía suficiente para bombeo (ref. [5]). El radio del rotor se obtiene para la velocidad de la corriente en las condiciones de diseño.

ii) Velocidad específica de rotación o celeridad

La relación entre la velocidad tangencial máxima del rotor (u_a) y velocidad de la corriente (v_0) es conocida como Coeficiente de velocidad específica o celeridad, y es un dato útil para determinar los datos necesarios para el dimensionamiento. Como ya se mencionó:

$$\lambda = u_a / v_0 \quad (3.8)$$

pero, usando:

$$u_a = \Omega \cdot R = 2\pi \cdot N \cdot R / 60 \quad (3.9)$$

en donde:

u_a : velocidad tangencial máxima del rotor (m/s)

Ω : velocidad angular del rotor (rad/s)

N : rpm del rotor (rpm)

R : radio del rotor (m)

se obtiene:

$$\lambda = (2\pi/60)(N.R / v_0) \quad (3.10)$$

El valor de λ_d (celeridad de diseño) depende de la relación de velocidades que se quiera lograr. Esta relación de velocidades guarda estrecha vinculación con el tipo de aplicación del sistema de bombeo, pues como indica la fórmula (3.10), λ_d es directamente proporcional a N (número de revoluciones).

La determinación de λ_d a partir de la aplicación se hace utilizando las siguientes relaciones:

TABLA 3.3: VALORES DE λ_d	
Rotores lentos acoplados a bombas de pistón	1 - 2
Rotores veloces para generación eléctrica	4 - 10
Fuente : Ref. [6].	

iii) Número de álabes

La elección del número de álabes está muy ligada al valor del coeficiente de velocidad específica y a las dimensiones del rotor. En efecto, la tabla siguiente presenta (aún si los datos han sido determinados para sistemas de bombeo accionados por energía eólica) la relación entre celeridad (velocidad específica) y número de álabes (B).

λ_d	B
1	6 - 20
2	4 - 12
3	3 - 6
4	2 - 4
5 - 8	2 - 3
8 - 15	1 - 2

Fuente : Ref. [7].

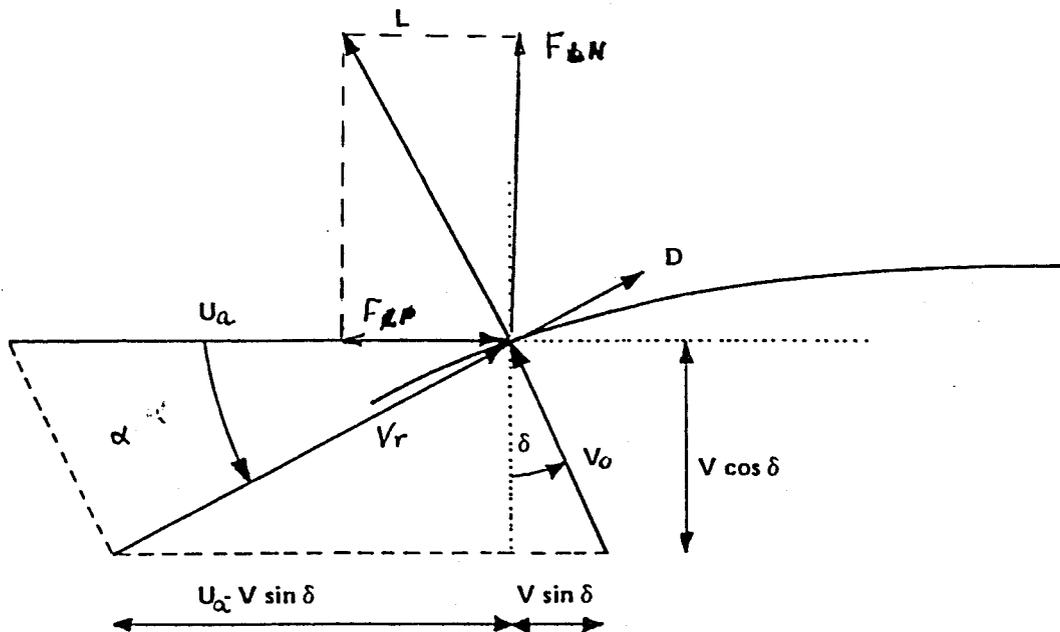
Mientras que la tabla siguiente muestra la relación entre radio del rotor y número de álabes para turbinas multipalpas modernas:

R (m)	B
1,5	12
2,0	12
2,5	12
3,0	10-12
3,5	10
4,0	8

Fuente : Ref. [8].

iv) Tipo de álabes

Como ha sido explicado anteriormente, los rotores de tipo propeller funcionan debido a fuerzas de sustentación y arrastre. Los álabes de estos rotores tienen sección hidrodinámica, gracias a la cual, cuando se colocan formando un ángulo relativo con la dirección de la corriente, producen una fuerza de sustentación que forma un ángulo recto con la velocidad relativa del agua vista desde el álabes. La velocidad relativa es la suma vectorial de la velocidad de la corriente y la velocidad del álabes. (ver figura 3.2).



- v_0 : Velocidad de la corriente (absoluta)
- u_a : Velocidad del álabe (absoluta)
- v_r : Velocidad relativa de la corriente
- F_{LP} : Componente de la fuerza de sustentación en el plano de rotación del rotor
- F_{LN} : Componente de la fuerza de sustentación normal al plano de rotación del rotor
- α : Ángulo que forman v_r y u_a (ángulo de ataque)

Figura 3.2 : Diagrama de velocidades y fuerzas en el álabe

Fuente : Ref. [9].

La fuerza de sustentación (F_D) es proporcional al ángulo de ataque (α). Cuando una carga es conectada a la turbina, la velocidad de la turbina disminuye; esto incrementa el valor de α (ángulo entre v_r y la cuerda del álabe), y por consiguiente se incrementa la fuerza de sustentación. Si la carga aumenta aún, α aumenta hasta que supera el ángulo de producción de energía de la sección, por lo que esa parte del álabe deja de dar potencia al rotor. Una vez que grandes partes del rotor llegan a esta condición, la turbina se detiene.

Las fuerzas de sustentación y arrastre que experimenta el álabe pueden ser calculados mediante las siguientes fórmulas:

$$F_L = 0,5 \cdot C_L \cdot \rho \cdot v_0^2 \cdot A_a \quad (3.11)$$

$$F_D = 0,5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot v_0^2 \cdot A_a \quad (3.12)$$

En donde:

F_L : fuerza de sustentación (N)

F_D : fuerza de arrastre (N)

C_L : coeficiente de sustentación

C_D : coeficiente de arrastre

ρ : densidad del agua (kg/m^3)

v_0 : velocidad de la corriente antes de la turbina (m/s)

A_a : área proyectada del álabe (cuerda*longitud) (m^2)

Los coeficientes de arrastre y de sustentación varían con el número de Reynolds, pero estos efectos pueden considerarse de segundo orden (ref. [10]).

Los parámetros necesarios para proceder al dimensionamiento del rotor, son α (ángulo de ataque) y C_L (coeficiente de sustentación). Estos datos se obtienen experimentalmente a partir del tipo de álabe.

Por lo general los valores de C_L y C_D (coeficientes de sustentación y arrastre, respectivamente) en función de α se presentan en gráficos obtenidos experimentalmente. A manera de ejemplo presentaremos la curva C_L vs. C_D de un perfil para un determinado valor de α .

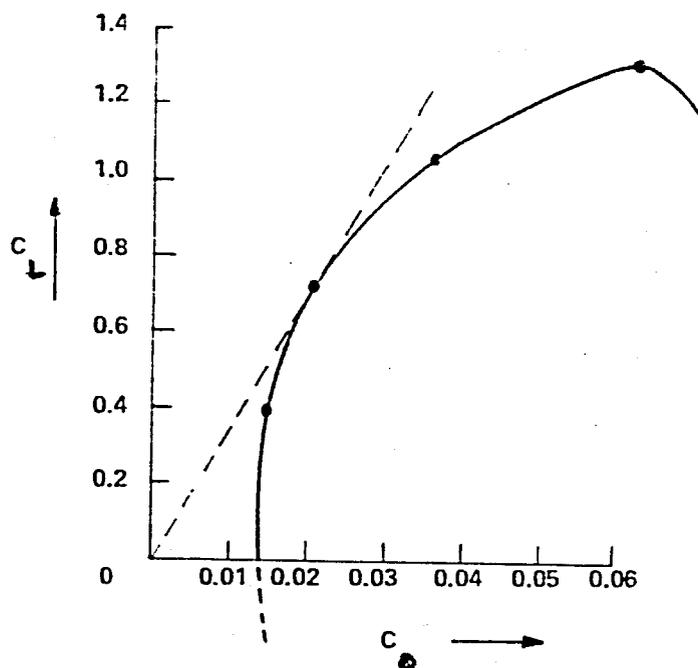


Figura 3.3: Valores de C_L y C_D para un valor de α

Fuente : Ref. [11].

La tangente trazada desde el origen hacia la curva $C_L - C_D$ indica el ángulo de ataque α con la mínima relación C_D/C_L . Esta relación determina el máximo C_p (coeficiente de potencia) que se puede obtener con este tipo de ábabe. Los valores de C_L y la relación C_D/C_L son parámetros importantes para el proceso de diseño. A continuación presentamos una tabla con estos valores para diferentes tipos de álabes que pueden ser utilizados en turbinas de corriente libre.

TABLA 3.6 : $\alpha - C_L$ PARA DIFERENTES ALABES			
	C_D/C_L	α	C_L
Placa plana	0,10	5°	0,80
Placa curvada (10% de curvatura)	0,02	3°	1,25
Placa curvada con tubo en el lado cóncavo	0,03	4°	1,10
Placa curvada con tubo en el lado convexo	0,20	14°	1,25
Perfil NACA 4412	0,01	4°	0,80

Fuente : Ref. [12].

Por otra parte, también C_p varía en función de la relación C_D/C_L y en función de la velocidad específica (λ), por lo que normalmente se emplean curvas λ vs. C_p para diferentes relaciones C_D/C_L con el objeto de mostrar la variación de la potencia con la velocidad, manteniendo el gráfico independiente de la velocidad de la corriente.

Para obtener la máxima potencia de un rotor, se debe tratar de hacerlo operar con un λ que haga C_p el máximo posible. Se debe tener en cuenta además que la velocidad del rotor es inversamente proporcional al número de álabes y a la longitud de la cuerda del álabes. El siguiente gráfico da los valores de $C_{p_{max}}$ en función de λ y la relación C_D/C_L .

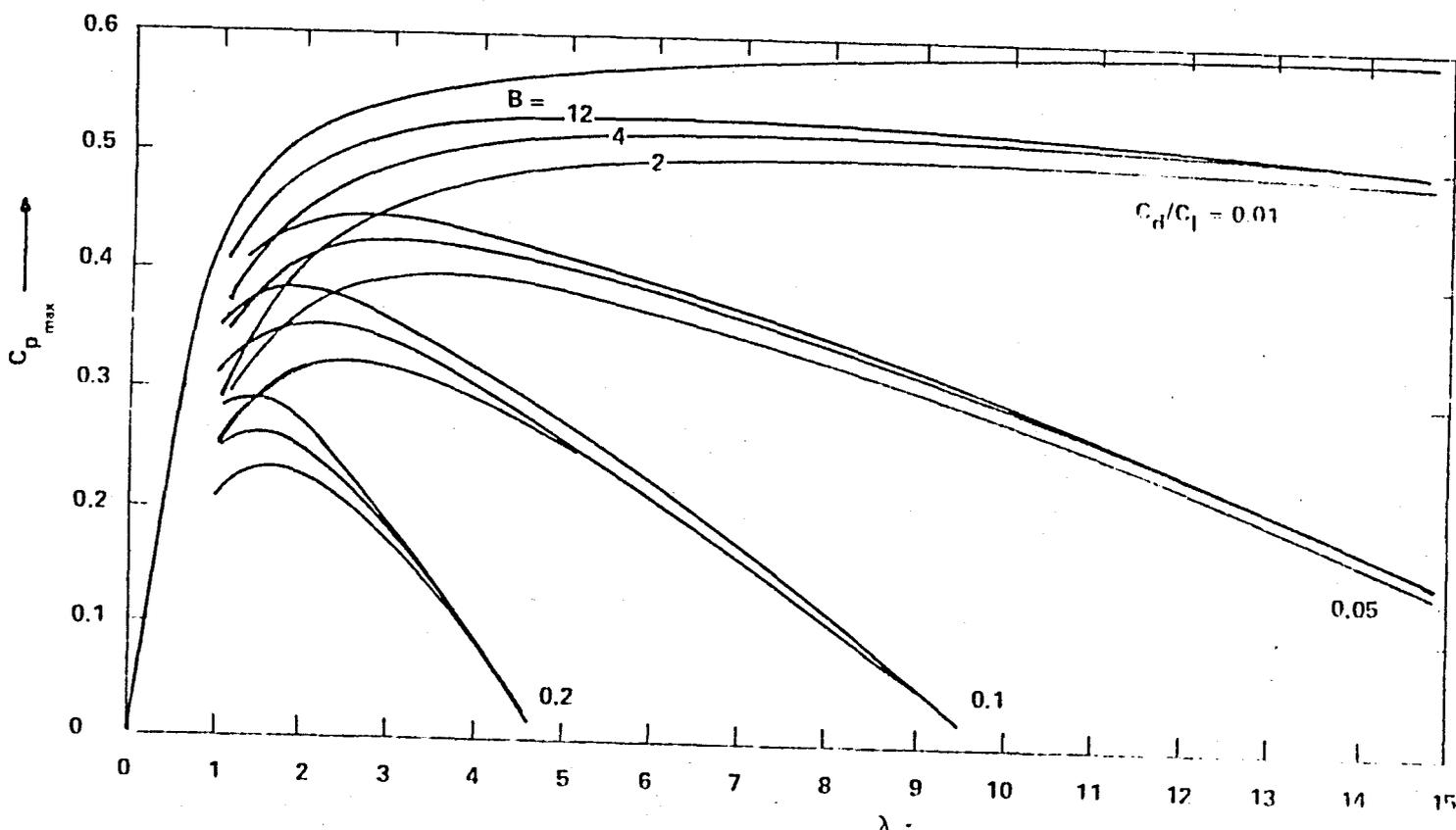


Figura 3.4 : Variación de $C_{p_{max}}$ en función de λ

Fuente: Ref. [13].

3.3.2 Geometría del Álabo

i) Expresiones matemáticas

Las siguientes expresiones permiten determinar las características geométricas del álabo. Estas características son el ángulo β (ángulo de setting) y c (longitud de cuerda) para diferentes posiciones del álabo, y son las que permiten la construcción física del álabo. Como es posible apreciar, para determinar c y β es necesario contar previamente con los valores de R , λ_d , B , C_{Ld} , y α . (Ver sección 3.3.1)

$$\text{longitud de cuerda: } c = 8\pi r (1 - \cos \beta) / (B \cdot C_{Ld}) \quad (3.13)$$

$$\text{ángulo de setting: } \beta = \phi - \alpha \quad (3.14)$$

$$\text{ángulo de flujo: } \phi = 2/3 \arctan (1/\lambda_r) \quad (3.15)$$

$$\text{celeridad local: } \lambda_{rd} = \lambda_d \cdot (r/R) \quad (3.16)$$

En donde:

r : punto al que se escoge la longitud de cuerda c

ϕ : ángulo de flujo

B : número de álabes

C_{Ld} : Coeficiente de sustentación a las condiciones de diseño

α : ángulo de ataque

λ_r : celeridad del álabo en el punto r

λ_{rd} : celeridad de diseño en el punto r

λ_d : celeridad de diseño.

R : radio del rotor

Estas fórmulas son válidas para el rotor operando a su máximo coeficiente de potencia ($C_{p_{max}}$), el cual representa las condiciones de diseño del rotor.

La determinación de c y β en diferentes puntos del álabo puede hacerse usando dos métodos: el primero es manteniendo C_{L0} constante en todo el álabo, lo que da como resultado que c y β varían con r (ver fórmulas 3.13 a 3.16). Este método permite obtener la mayor potencia posible del rotor, pero complica la fabricación del álabo pues la longitud de la cuerda y la curvatura cambian a lo largo de éste. El segundo método (llamado "de la cuerda constante") es manteniendo c constante a lo largo del álabo y haciendo variar C_{L0} . Este último procedimiento permite una mayor facilidad constructiva, y es el que será seguido en el presente trabajo.

Por otra parte, para determinar el valor óptimo de la cuerda, se calcula el efecto de la cuerda constante en los otros parámetros del rotor. Para esto, se asume que el gráfico $C_L - \alpha$ es lineal, es decir de la forma:

$$C_L = C_{L0} + (d C_L / d \alpha) \cdot \alpha \quad (3.17)$$

En donde C_{L0} es el valor de la función en el punto $\alpha = 0$. Despejando α y haciendo $d C_L / d \alpha = C_L'$ y reemplando en 3.14:

$$\beta = \phi - (C_L - C_{L0}) / C_L' \quad (3.18)$$

Reemplazando C_L con los valores de la ecuación (3.13), r con los valores de (3.16), y λ_{rd} con los valores de (3.15), obtenemos:

$$\beta = \phi - 8\pi R / (B.c. \lambda \cdot C_L') * (1 - \cos \phi) / \tan (1,5 \phi) + C_L / C_L'$$

y haciendo $(1 - \cos \phi) / \tan(1,5 \phi) = \phi / 3$ (válido para ϕ pequeño, en radianes), se obtiene:

$$\beta = \phi - 8.\pi.R.\phi / (3.B.c.\lambda.C_L') + C_{L0} / C_L' \quad (3.19)$$

Esto quiere decir que para que β sea constante (con las consiguientes facilidades constructivas) se debe cumplir que:

$$8.\pi.R / (B.c.\lambda.C_L') = 3 \quad (3.20)$$

$$y \quad \beta = C_{L0} / C_L' \quad (\text{en radianes}) \quad (3.21)$$

La expresión (3.20) permite calcular el valor de c que permite las menores variaciones en el ángulo β . Para el cálculo de β en diferentes puntos del álabes se sigue el procedimiento indicado a continuación.

ii) Procedimiento

Dado que las variaciones en C_L pueden sólo lograrse con variaciones en el ángulo de ataque (α), es necesaria una quinta relación a las fórmulas (3.13) a (3.16), esta relación es $C_L = C_L(\alpha)$. Por tanto, es necesario incluir gráficos de este tipo para lograr el dimensionamiento. Este gráfico también servirá para calcular los valores de C_{L0} y C_L' . A continuación, se incluye un gráfico para álabes del tipo placa curvada con tubo en el lado cóncavo (ver Tabla 3.2).

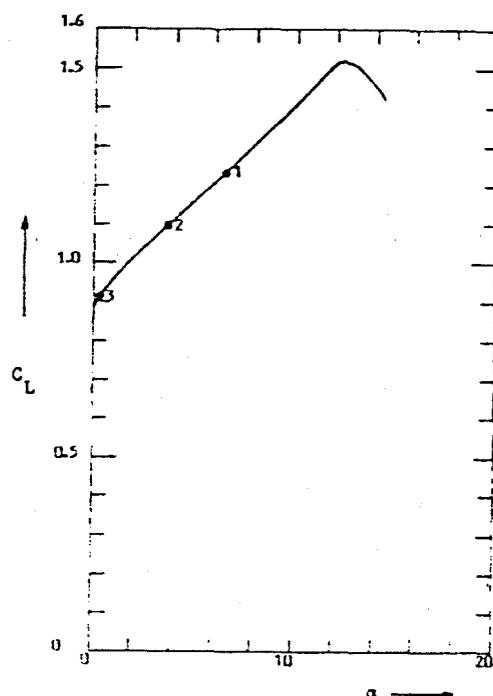


Figura 3.5 : $C_L(\alpha)$ para placa curvada (10%) con tubo en el lado cóncavo.

Fuente : Ref. [14].

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. Se determina R , λ_d y B , para el rotor y se selecciona el tipo de álabe;
2. Se determina la longitud de cuerda, lo cual se hace gracias a la fórmula (3.20) y a las facilidades constructivas ligadas a la disponibilidad del material necesario para la construcción;
3. Se escogen un punto a una distancia "r" en donde es necesario conocer el valor de β para dar la curvatura adecuada;
4. Usando la fórmula (3.16) se determina $\lambda_{r d}$;
5. Con la fórmula (3.15) se halla ϕ ;
6. Usando la fórmula (3.13) se obtiene el valor de ζ_d despejando;

7. Usando el gráfico de la figura 3.4 se determina el valor de α ;
8. Con la fórmula (3.14) se obtiene el valor teórico de β ;
9. Se escoge un valor de β cercano al teórico que permita la facilidad constructiva;
10. Se repite el procedimiento para otros puntos;
11. Se tabulan los resultados.

3.4 Diseño de la Bomba

Para lograr el bombeo de agua con bombas reciprocantes, es necesario un alto torque de arranque del rotor, dado que, al mismo tiempo que el rotor inicia a girar, el rotor debe vencer la carga de agua contenida en las tuberías, desde el nivel del río hasta el lugar de consumo.

En la figura siguiente se pueden ver las curvas torque-velocidad específica para diferentes tipos de rotores, indicando el torque de arranque de cada uno de ellos.

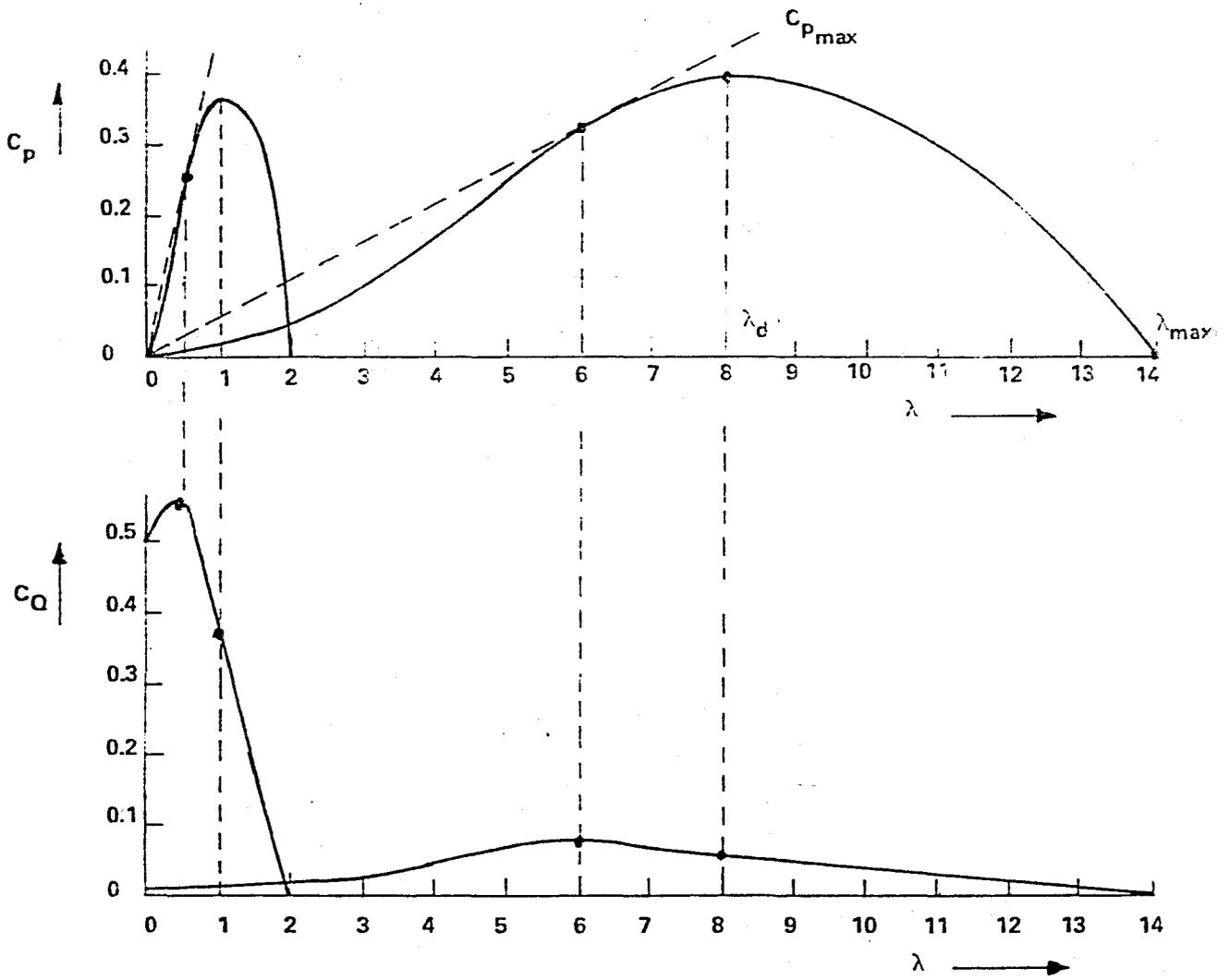


Figura 3.5 : Curvas torque-velocidad especifica

Fuente : Ref. [15]

3.4.1 Selección de la carrera y diámetro

El cálculo de la carrera y del diámetro de la bomba se hace en función del volumen medio que deberá ser bombeado. Este dato puede calcularse igualando:

Potencia neta del rotor-bomba = Potencia hidráulica

$$\eta_{\text{total}} P_{\text{mec}} = P_{\text{hid}} \quad (3.22)$$

$$\eta_{\text{total}} (0,5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot R^2) = Q_d \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (3.23)$$

lo que en las condiciones de diseño equivale a:

$$\eta_{\text{total}} (0,5 \cdot C_{p_{\text{max}}} \cdot \rho \cdot v_d^3 \cdot \pi \cdot R^2) = Q_d \cdot \rho \cdot g \cdot H_d \quad (3.24)$$

En donde:

- η_{total} : eficiencia mecánica total sin considerar la eficiencia del rotor (ver pag. 82)
- $C_{p_{\text{max}}}$: coeficiente de potencia máximo del álabe
- ρ : densidad del agua (kg/m^3)
- v_d : velocidad de diseño de la corriente (m/s)
- R : radio del rotor (m)
- Q_d : caudal de diseño (m^3/s)
- g : aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)
- H_d : altura de bombeo de diseño (m)

Despejando el caudal de diseño, se obtiene:

$$Q_d = \eta_{\text{total}} (0,5 \cdot C_{p_{\text{max}}} \cdot v_d^3 \cdot \pi \cdot R^2) / (g \cdot H_d) \quad (3.25)$$

Por otra parte, partiendo de la expresión del volumen bombeado por una bomba de pistón en cada golpe, podemos hallar la siguiente expresión para el caudal bombeado por estas bombas:

$$Q = (2\pi.N/60).(\pi.S.d_p^2/4).\eta_v \quad (3.26)$$

En donde:

Q : caudal medio de la bomba (m^3/s).

N : número de revoluciones del rotor (rpm)

d_p : diámetro del pistón (m)

S : carrera del pistón (m)

η_v : eficiencia volumétrica de la bomba (adimensional)



Igualando las expresiones anteriores, es posible obtener una relación del tipo $S.d_p^2 = cte.$ entre la carrera de la bomba y el diámetro. Para resolver el sistema, se debe tener en cuenta además que se recomienda que en el punto de diseño la relación S/d_p tenga un valor de 0,7 a 1,2 (ref. [16]).

Por último, luego de resolver el sistema, se seleccionan las dimensiones más adecuadas para la bomba de pistón, teniendo en cuenta las facilidades constructivas.

REFERENCIAS

- [1] Fraenkel, P., WATER LIFTING DEVICES, FAO Irrigation and Drainage Paper, N°43, Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1986. p. 246.
- [2] Lysen, E. H., INTRODUCTION TO WIND ENERGY, Segunda Edición, Amersfoort (Holanda), Consultancy Services Wind Energy Developing Countries, 1983. p. 17.
- [3] Garman, P., WATER CURRENT TURBINES: A FIELDWORKER'S GUIDE, Londres, Intermediate Technology Publications Ltd., 1986. p. 9.
- [4] Ibid., p. 15.
- [5] Ibid., p. 12.
- [6] Lysen, E. H., op. cit., p. 67.
- [7] Ibid., p.66.
- [8] Marín, E., DISEÑO, CONSTRUCCION E INSTALACION DE EQUIPOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA EOLICA, artículo presentado al Foro "La Energía en el Perú, Situación y Perspectivas", Universidad de Lima, Lima, 1987. p. 9.
- [9] Garman, P., op. cit., p. 86.
- [10] Lysen, E. H., op. cit., p. 58.
- [11] Ibid.
- [12] Ibid., p. 59.
- [13] Ibid., p. 64.
- [14] Ibid., p. 70.
- [15] Ibid., p. 55.
- [16] Marín, E., op. cit., p.10.

CAPITULO 4 : DIMENSIONAMIENTO BASICO

4.1 Premisas

El dimensionamiento del sistema se hará siguiendo las pautas establecidas en los capítulos anteriores. El cálculo de las necesidades de agua se llevará a cabo utilizando los datos provistos en el primer capítulo, mientras que el dimensionamiento propiamente dicho, será llevado a cabo con el empleo de las expresiones y del procedimiento indicados en el tercer capítulo.

Por otro lado, independientemente de los factores estrictamente técnicos que se deben tener en cuenta para el dimensionamiento, existen otros factores que deben considerarse para el diseño de la turbina. Estos son la presencia de, por ejemplo:

- animales del río, como peces u otros animales mayores.
- materias orgánicas en suspensión (en estos casos es recomendable preveer la utilización de un filtro para la bomba).
- corrientes de viento, las que pueden ocasionar movimiento de los flotadores, ocasionando variaciones en la velocidad de rotación

de la turbina. Por tanto es recomendable tratar de fijar los flotadores a la orilla del río mediante cables u otros.

variación estacional del nivel del río.

Debe tenerse en cuenta además, que existen límites al número de personas que pueden ser abastecidas por un sólo punto de aprovisionamiento de agua, debido principalmente a la necesidad de no causar tiempos de espera irracionales en la gente que debe proveerse de agua, así como a la necesidad de la gente de no recorrer distancias excesivas. Desde este punto de vista, se recomienda que una sólo fuente de agua no abastezca a más de 500 personas. Lo mismo es válido para los animales para prevenir el sobrepastoreo en los lugares cercanos a la fuente de agua. En este caso no deben abastecerse más de 500 animales, dando un requerimiento total de agua de aproximadamente 20 m^3 por día.

Para explicar en manera didáctica el procedimiento que se debe seguir para el dimensionamiento básico, nos serviremos del ejemplo indicado a continuación.

Ejemplo : Sistema de bombeo para uso doméstico, para un poblado de 1000 habitantes (proveyendo 50 l/hab/día). Altura de bombeo 10 m y velocidad promedio de la corriente en el mes de diseño de 1,0 m/s.

Datos: V : 50 m^3 /día (tabla 1.2)
 V_d : 75 m^3 /día (tabla 1.3)
 H : 10 m
 v_d : 1 m/s

4.2 Dimensionamiento Básico de la Turbina

Con los datos anteriores y siguiendo el procedimiento indicado en la página 84, calculamos:

R (radio del rotor):

$$R = \sqrt{V_d \cdot H_d / (969 \cdot v_d^3 \cdot \cos \theta)} \quad (3.7)$$

reemplazando, con $\theta = 40^\circ$:

$$R = \sqrt{(75)(10) / 969(1,0)^3 \cos 40^\circ}$$

$$R = 1,0 \text{ m}$$

Escogemos además:

$$\lambda_d = 1,5 \quad (\text{tabla 3.3})$$

y con $\lambda_d = 1,5$ y $R = 1,0$, escogemos:

$$B = 12 \quad (\text{tablas 3.4 y 3.5})$$

Por facilidades constructivas escogemos un álabe formado por una placa curvada (10% de curvatura) soldada a un tubo en el lado cóncavo. Este tipo de álabe es común y es recomendado (ref. [1]) por razones de construcción y costo para la fabricación de álabes para aerobombas.

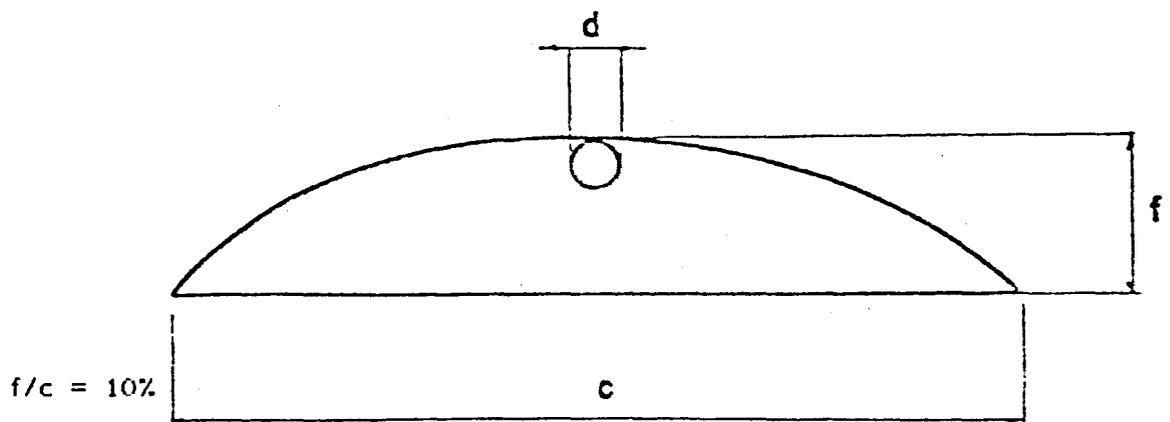


Figura 4.1 : Sección del álabe utilizado

Fuente : Ref. [2].

Por tanto, de la Tabla 3.6:

$$\alpha = 4^\circ$$

$$\zeta = 1,1$$

A continuación, procedemos a determinar los valores de c y β en diferentes puntos del ábake. El valor de c generalmente se determina a partir de las características geométricas de la materia prima, y por facilidades constructivas. En el presente caso, asumimos que las láminas de donde se fabricarán los 12 ábakes tienen como dimensiones 1,2 m por 2,4 m. Con esto las dimensiones de cada ábake serán 1,0 m por 0,4 m (sin curvar).

Por otro lado, usando la figura 3.4 determinamos:

$$\zeta_0 = 0,9$$

$$y \quad \zeta_L' = (1,5 - 0,9)/12^\circ = 2,86$$

Con la fórmula (3.21) determinamos:

$$\beta = 0,9/2,86 = 18^\circ$$

y con la fórmula (3.20) determinados c :

$$8 \cdot \pi \cdot R / (B \cdot c \cdot \lambda \cdot \zeta_L') = 3$$

$$c = 8 \cdot \pi \cdot R / (3 \cdot B \cdot \lambda \cdot \zeta_L') = 0,1627 \text{ m}$$

Estas dimensiones de c son posibles de fabricar a partir de la lámina seleccionada, por lo que asumiremos este valor para el cálculo posterior.

Luego escogemos diferentes puntos en los que se determinará el ángulo β . Tomamos los siguientes puntos (teniendo en cuenta que el radio del rotor es de 1 m), ver Figura 4.2:

$$r_1 : 0,250 \text{ m}$$

$$r_2 : 0,375 \text{ m}$$

$$r_3 : 0,500 \text{ m}$$

$$r_4 : 0,625 \text{ m}$$

$$r_5 : 0,750 \text{ m}$$

$$r_6 : 0,875 \text{ m}$$

$$r_7 : 1,000 \text{ m}$$

Utilizamos las siguientes fórmulas dadas en el capítulo 3:

$$\text{longitud de cuerda: } c = 8\pi r (1 - \cos \phi) / (B.C_{L_d}) \quad (3.13)$$

$$\text{ángulo de setting: } \beta = \phi - \alpha \quad (3.14)$$

$$\text{ángulo de flujo: } \phi = 2/3 \arctan (1/\lambda_r) \quad (3.15)$$

$$\text{celeridad local: } \lambda_{r,d} = \lambda_d \cdot (r/R) \quad (3.16)$$

Usando la fórmula (3.16) se determina $\lambda_{r,d}$ con la fórmula (3.15) se halla ϕ , y luego con la fórmula (3.13) se obtiene, despejando, C_{L_d}

Con el gráfico de la Figura 3.4, se determina el valor de α y a continuación, con la fórmula (3.14), el valor teórico de β . El valor práctico de β se determina por facilidades constructivas (se recomienda una variación lineal de β a lo largo del álabe). Los valores se presentan en la tabla de la página siguiente.

r	λ_{rd}	C_{Ld}	α	$\beta_{\text{teórico}}$	$\beta_{\text{práctico}}$
0,250	0,375	0,99	1,3°	45,0°	32°
0,375	0,563	1,15	5,0°	35,4°	30°
0,500	0,750	1,19	5,5°	29,9°	28°
0,625	0,938	1,17	5,0°	26,2°	26°
0,750	1,125	1,11	4,0°	23,8°	24°
0,875	1,313	1,04	2,8°	22,1°	22°
1,000	1,500	0,98	1,2°	21,3°	20°

Con estos valores queda establecido el dimensionamiento básico del rotor de nuestro ejemplo pues se conocen ya las características que permiten su construcción. A continuación determinaremos las características principales de la bomba de pistón.

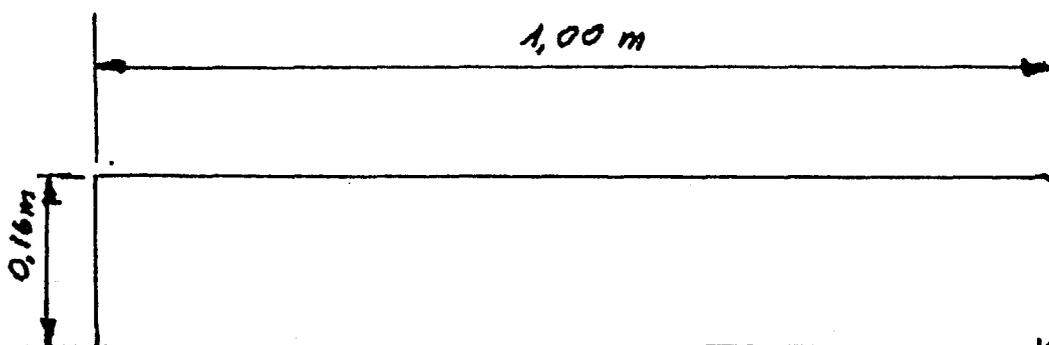


Figura 4.2 : Dimensiones del álabe utilizado

4.3 Dimensionamiento Básico de la Bomba

Determinamos el caudal que debe bombear la bomba de pistón mediante la fórmula:

$$Q_D = \eta_{\text{total}} (0,5 \cdot C_{p_{\text{max}}} \cdot v_d^3 \cdot \pi \cdot R^2) / (g \cdot H_D) \quad (3.25)$$

El valor de $C_{p_{\text{max}}}$ se determina gracias al gráfico de la figura 3.3. En nuestro ejemplo, con $\lambda = 1,5$, $B = 12$ y $C_D/C_L = 0,03$:

$$C_{p_{\text{max}}} = 0,38$$

y por tanto, haciendo $\eta_{\text{total}} = 0,8 * 0,45 * 0,8 = 0,2880$ (tabla 3.2, excluyendo el rotor:

$$Q_D = 0,288 (0,5) (0,38) (1)^3 \cdot \pi \cdot (1,0)^2 / (9,81 * 10)$$

$$Q_D = 0,0018 \text{ m}^3/\text{s}$$

A continuación, se determina la carrera y el diámetro del pistón usando la siguiente ecuación, igualando al caudal de diseño:

$$Q_D = (2\pi \cdot N/60) \cdot (\pi \cdot S \cdot d_p^2 / 4) \cdot \eta_v \quad (3.22)$$

Asumiendo una eficiencia volumétrica de 85%, y usando $\Omega = 2\pi N/60$, velocidad angular del rotor (rad/s), y reemplazando $\Omega = v_d/R$, es decir:

$$S \cdot d_p^2 = (4 \cdot R \cdot Q_D) / (\eta_v \cdot v_d \cdot \pi)$$

Se obtiene:

$$S \cdot d_p^2 = (4 * 1,00 * 0,0018) / (0,85 * 1 * \pi) = 0,0027 \text{ m}^3$$

Que, haciendo $S/d_p = 1$, da como resultado:

$$d_p = 0,14 \text{ m}$$

$$S = 0,14 \text{ m}$$

Estos valores permiten el dimensionamiento básico de la bomba, por otra parte, previamente hemos calculado las características geométricas más importantes del rotor, por lo que se puede afirmar que el sistema ha sido dimensionado en forma básica. Los detalles constructivos que permiten el adecuado dimensionamiento de los demás elementos constitutivos del sistema no son materia de esta tesis, pero se espera que este trabajo haya provisto datos suficientes para poder proseguir en el dimensionamiento.

REFERENCIAS

- [1] OLADE, MOLINOS DE VIENTO PARA BOMBEO DE AGUA, Documentos OLADE, Quito, Organización Latinoamericana de Energía, 1984. p. 42.
- [2] Ibid., p. 43.

CONCLUSIONES

1. Las necesidades energéticas de las zonas rurales pueden ser satisfechas gracias al empleo de energía renovable. En este caso hemos analizado una turbina que aprovecha la energía cinética de un río, pero también otros sistemas de bombeo que empleen fuentes renovables de energía pueden ser aptos para zonas aisladas de nuestro país.
2. La turbina de corriente libre se presenta como una alternativa para la provisión de agua en zonas en las que no existe un salto disponible. La energía cinética de un río es más "densa" (más energía por unidad de área) que la energía eólica pero no puede competir con la energía disponible en un pequeño salto.
3. La teoría de sistemas de bombeo eólicos es apta para los cálculos de turbinas de corriente libre, pues en general está referida a una turbina puesta en medio de una corriente fluida y los parámetros son adimensionales. Pese a todo es importante considerar que muchas fórmulas empíricas en las que aparece la densidad pueden haber sido calculadas específicamente para sistemas de bombeo propulsados por corrientes de aire.
4. Han habido numerosas experiencias a nivel nacional e internacional en las que se trata de aprovechar la energía contenida en una corriente fluida de agua. Muchos de éstos pueden haber sido aptos a otras realidades en las que son económicamente competitivos, pero en nuestro medio su competitividad (sobre todo debido a los altos costos iniciales) es cuestionable. Para que un sistema como el propuesto sea competitivo, los costos de fabricación deben ser suficientemente bajos.

5. Las posibles aplicaciones de un sistema como el propuesto son la irrigación a pequeña escala, la ganadería y la provisión de agua para consumo humano. En este último caso, y dado que se bombea energía directamente del río, se deberá poner especial atención en la calidad del agua.
6. Una de las características geométricas indispensables e importantes en el dimensionamiento del rotor es el ángulo de setting, el cual determina el modo en que cada parte del rotor contribuye a la generación de potencia. Para tener la facilidad de manufacturar el álabes con cuerda constante, es necesario mantener un ángulo de curvatura a lo largo del mismo, lo que permite aprovechar al máximo la energía de la corriente.
7. Las bombas de desplazamiento positivo se adaptan mejor a las características de un sistema de baja velocidad como éste, y evitan la inclusión de costosas transmisiones.
8. El procedimiento de cálculo para el dimensionamiento del rotor es relativamente sencillo y, cuando se cuenta con datos confiables, se logra una buena aproximación.
9. Una de las tareas más difíciles para lograr un funcionamiento óptimo del sistema es la correcta determinación de la velocidad de diseño de la corriente.
10. Para lograr la máxima potencia de un sistema como el propuesto, se debe tratar que el proceso de fabricación del sistema, de dimensiones lo más cercanas posibles a las dimensiones determinadas teóricamente, a un costo razonable.

BIBLIOGRAFIA

- CEE, ELECTRIFICATION RURALE DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT, Bruselas, Commission des Communautés Européennes, Direction Generale du Développement, 1985.
- Collett, J., "Hydropowered Water Lifting Devices for Irrigation", PROCEEDINGS OF THE FAO/DANIDA WORKSHOP ON WATER LIFTING DEVICES IN ASIA AND THE NEAR EAST, BANGKOK, 1979, Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1980.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W., LAS NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1983.
- Fraenkel, P.L., WATER LIFTING DEVICES, FAO Irrigation and Drainage Paper 43, Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986.
- Garman, P., WATER CURRENT TURBINES: A FIELDWORKER'S GUIDE, Londres, Intermediate Technology Publications, 1986.
- Haentjens y Maillard, ENERGIES RENOUVELABLES ET HYDRAULIQUE VILLAGEOISE DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT, Bruselas, Commission des Communautés Européennes, Direction Generale du Développement, 1985.
- Helvetas, MANUAL FOR RURAL WATER SUPPLY, WITH MANY DETAILED CONSTRUCTIONAL SCALE-DRAWINGS, St. Gall (Suiza), Swiss Centre for Appropriate Technology (SKAT), 1985.
- Hofkes, E.H. y Visscher, J.T., RENEWABLE ENERGY SOURCES FOR RURAL WATER SUPPLY, Technical Paper 23, La Haya, International Reference Center for Community Water Supply and Sanitation, 1986.
- Inversin, A., MICRO-HYDROPOWER SOURCEBOOK: A PRACTICAL GUIDE TO DESIGN AND IMPLEMENTATION IN DEVELOPING COUNTRIES, Washington D.C., NRECA International Foundation, 1986.
- IRC, ALTERNATIVE ENERGY SOURCES FOR DRINKING WATER SUPPLY IN DEVELOPING COUNTRIES, La Haya, International Reference Centre for Water Supply and Sanitation, 1983.
- Kenna, J. y Gillett, B., SOLAR WATER PUMPING: A HANDBOOK, Londres, I.T. Publications, 1985.

- Kristoferson, L. y Bokalders, V., RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: THEIR APPLICATIONS IN DEVELOPING COUNTRIES, Oxford, Pergamon Press Ltd., 1986.
- Leyland, B. W., "Equipment for Small Hydro Schemes: A Review of Progress", WATER POWER & DAM CONSTRUCTION, Volumen 39, Número 4, Surrey, Reed Business Publishing, 1987.
- Lysen, E. H., INTRODUCTION TO WIND ENERGY. Segunda Edición, Amersfoort (Holanda), Consultancy Services Wind Energy Developing Countries, 1983.
- Lobo Guerrero, J., DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT CURRENT WATER WHEEL, Bogotá, Universidad de los Andes, 1985.
- Marín, E., DISEÑO, CONSTRUCCION E INSTALACION DE EQUIPOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA EOLICA. articulo presentado al Foro "La Energía en el Perú, Situación y Perspectivas", Universidad de Lima, Lima, 1987.
- Mayorga, Emilio, "Riobomba: Una alternativa de riego para zonas rurales", INFORMACION TECNOLOGICA. Año 3, número 9, Lima, Itintec, 1986.
- OLADE, MOLINOS DE VIENTO PARA BOMBEO DE AGUA, Documento OLADE, Quito, Organización Latinoamericana de Energía, 1984.
- Powell, A., IRRIGATION ENGINEERING, Nueva York, John Wiley & Sons Inc., 1919.
- Pürschel, W., TRATADO GENERAL DEL AGUA Y SU DISTRIBUCION, Tomo 1: La Técnica de Aforo del Consumo de Aguas de Poblaciones (Parte 1º), Bilbao, URMO S.A. de Ediciones, 1983.
- Radkey, R., Lissaman, P. B. S. y Catherasco, C. J., "Run of River Ducted Turbines: A minimum system for the ultra low head resource", PROCEEDINGS OF THE WATER POWER 1981 CONFERENCE, Washington D.C., 1981.

