

## LA RUEDA HIDRAULICA

ALBERTO ALVAREZ CARDONA\*

### INTRODUCCION

La Energía hidráulica en nuestro país es una de las fuentes energéticas más abundantes y baratas que se consiguen. El máximo aprovechamiento hasta el momento se ha orientado hacia las grandes centrales hidroeléctricas que surten de energía a muchas zonas colombianas y muestran excedentes exportables a países vecinos. Sin embargo el abastecimiento a nivel rural sigue deficiente, especialmente por su alto costo en la instalación de transformación y transporte de la energía a bajo voltaje.

Además de lo anterior, existen fuentes hidráulicas que por sus condiciones especiales no son aprovechadas como fuentes de energía por ausencia de energía cinética o potencial. Tal es el caso de muchos de nuestros ríos y quebradas en su estado natural.

El presente artículo está dedicado a recuperar y revivir una tecnología antigua que en otros tiempos fue aplicada con éxito en nuestro país y que por la aparición de otras fuentes energéticas fue cayendo en desuso, pero que actualmente por problemas surgidos especialmente en los hidrocarburos y sus derivados adquiere nueva importancia a nivel rural. Se trata de la rueda hidráulica con sus múltiples posibilidades de motor para utilizar su energía mecánica rotacional en forma directa o para generar electricidad en nuestros campos, directamente en el sitio en que se requiere y evitar así el alto costo de transporte y transformación antes anotado.

### 1. TEORIA BASICA

#### 1.1 POTENCIA DE LAS CORRIENTES DE AGUA.

Debe conocerse la velocidad  $V$  del agua y  $S$ : Sección del conductor (canal - tubería) por donde fluye el agua.

---

\* Ingeniero Agrónomo. Profesor Asociado Sección Mecanización Agrícola, Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional, Seccional Medellín.

Siendo:  $Q = S \cdot V$  (1)

donde:  $Q =$  Caudal (volumen/tiempo)

$S =$  Sección del conductor (área)

$V =$  Velocidad media del agua (longitud/tiempo)

### 1.1.1 Determinación de la velocidad.

1.1.1.1 Si un fluido sale por un orificio en el fondo del recipiente, situado a una altura  $H$  del nivel del fluido, tendremos: Ver Figura 1.

$$V = (2 \cdot g \cdot H)^{1/2} \quad (2)$$

Siendo:  $V =$  Velocidad teórica salida del fluido (L/T).

$H =$  Diferencia de altura entre orificio y nivel del fluido (L).

$g =$  Aceleración de la gravedad (L/T<sup>2</sup>).

1.1.1.2 Si el fluido sale por un orificio en las paredes laterales del recipiente, tendremos: Ver Figura 2 .

$$V = (2 \cdot g \cdot H)^{1/2} \quad (2)$$

Siendo:  $V =$  Velocidad teórica del fluido (L/T).

$H =$  La distancia que hay entre la superficie del fluido y el centro de gravedad del orificio (L).

### 1.1.2 Determinación del caudal.

1.1.2.1 Caudal teórico: será igual a:

$$Q_t = S \cdot (2 \cdot g \cdot H)^{1/2} \quad (3)$$

Siendo:  $S =$  Area de la sección del orificio (L<sup>2</sup>).

1.1.2.2 Caudal práctico: será igual a:

$$Q_p = m \cdot S \cdot (2 \cdot g \cdot H)^{1/2} \quad (4)$$

Siendo:  $m =$  Coeficiente adimensional que depende de la forma del orificio o sea de la contracción de la vena fluida.

1.1.2.3 Contracción de la vena: depende de la forma del orificio de salida, así: Ver Figura 3.

- Para orificios cilíndricos: 0.625.

Para orificios cilíndricos con tubo cilíndrico adicional de un mismo diámetro: 0.820. Ver figura 4.

1.1.2.4 Velocidad media del fluido: debido a la adherencia a las paredes del conductor y al razonamiento interno de las capas de fluido, la velocidad superficial es mayor que la media. Como norma aproximada para cálculos tendremos:

$$\bar{V} = 0.8 V \quad (5)$$

Siendo:  $V$  = Velocidad superficial del fluido ( $L \cdot T^{-1}$ )

$$\bar{V} = \text{Velocidad media del fluido } (L \cdot T^{-1})$$

0.8 = Factor de corrección adimensional.

### 1.1.3 Compuertas.

Las compuertas se usan para que al subir y bajar regulen el orificio de salida variando el caudal. El caudal de salida por una compuerta se calcula como: Ver figura 5.

$$Q = 0.625 h' \cdot l \cdot (2 \cdot g \cdot H)^{1/2} \quad (6)$$

Siendo: 0.625 = Factor adimensional para compuertas verticales; en caso de ser inclinada  $45^\circ$  el factor será de 0.800 (adimensional).

$h$  = Altura del orificio (Variable) (L)

$H$  = Altura desde el centro del orificio hasta el nivel del agua represada (L).

$l$  = Ancho horizontal del orificio (L).

$Q$  = Caudal real del fluido ( $L^3/T$ ).

Nota: Cuando se instala una compuerta para alimentar un motor hidráulico, la altura  $H$  debe permanecer constante.

### 1.1.4 Vertederos.

El caudal que fluye a través de un vertedero está dado por: Ver figura 6.

$$Q = m \cdot l \cdot h' (2 \cdot g \cdot h')^{1/2} \quad (7)$$

Siendo:  $Q$  = Caudal que fluye a través del vertedero ( $L^3/T$ ).

$m$  = Coeficiente adimensional que varía en función de ( $h'$ ,  $L$  y  $l$ ). Para efectos de cálculo, podrá tomarse  $m = 0.40$  para  $l = 1/2 L$ , y  $m = 0.44$  cuando  $l = L$ .

$h$  = Altura de la lámina de agua que fluye encima de la cresta del vertedero (L).

L = Ancho del canal aguas arriba (L).

l = Ancho de la cresta del vertedero (L).

Nota: Al instalar un vertedero debe tenerse en cuenta:

- El borde debe quedar horizontal.
- La altura de la lámina de agua (h') debe medirse 1 mt. aguas arriba.

### 1.1.5 Saltos de agua.

Cuando se desea utilizar una corriente de agua como fuerza motriz, se prepara una presa transversal y la corriente de agua queda dividida en dos regiones: aguas arriba (canal de entrada) y aguas abajo (canal de salida) o canal de desagüe. Se da el nombre de saetín a la porción de canal que entrega el agua al receptor, es generalmente inclinado para evitar las fugas de agua (ver figura 8) y algunas veces se da forma circular abrazando las paletas de la rueda.

Canalizo: Se llama a la parte del canal en donde se hunde la rueda, se limita por paredes laterales verticales, su fondo se llama Alveo.

1.1.5.1 Trabajo absoluto o potencia dinámica del salto: se calcula así: Ver figura 7.

$$T_m = \frac{1.000 \cdot Q \cdot H}{75} \quad (8)$$

Siendo:  $T_m$  = Potencia en CV.

Q = Caudal de agua ( $L^3/T$ ).

1.000 = Factor conversión de ton. a  $m^3$

H = Diferencia de niveles o altura del salto (L).

1.1.5.2 Trabajo útil o potencia práctica de un salto de agua: un receptor hidráulico (máquina hidráulica) por perfecto que sea jamás utiliza toda la potencia dinámica de un salto por varias razones:

- Al chocar el agua con el receptor el agua pierde fuerza.
- No toda el agua actúa sobre el receptor, alguna escapa sin realizar trabajo.
- El agua al salir del receptor aún conserva energía (velocidad).

**Nota:** El mejor receptor es aquel en que el agua penetra con el menor choque posible; el que deja pasar sin trabajar a la menor cantidad de agua posible; en el que el agua sale con la menor velocidad posible es decir con velocidad del agua igual a la velocidad tangencial de la rueda.

Las eficiencias de utilización de potencia de los saltos tienen un máximo de 90% y un promedio admisible del 75%.

## 1.2 RECEPTORES HIDRAULICOS.

Se denominan así a las máquinas en las que el agua actúa como fuerza motriz y están diseñadas para transmitir la mayor proporción posible del trabajo absoluto del agua.

### 1.2.1 Rueda hidráulica.

Toda rueda hidráulica propiamente dicha se compone esencialmente de: (Ver Figura 8).

- Un eje horizontal A, sobre el cual se fija mediante radios un tambor circular T que lleva a intervalos paletas simples P o recipientes huecos (álabes) destinadas a oponer resistencia o llenarse de agua
- Una represa que retiene el agua antes de llegar a la rueda mediante una compuerta V que regula la altura y caudal de salida del agua.

1.2.1.1 Funcionamiento: el agua se precipita, animada de cierta velocidad contra las paletas o llena los álabes de la rueda y origina así la rotación de la rueda alrededor de su eje horizontal A. Normalmente se instala la rueda entre 2 paredes verticales que impiden el paso del agua fuera de la rueda.

1.2.1.2 Fórmula general del trabajo en los receptores hidráulicos: (ver Figura 7). Supongamos que el agua llega al receptor A con la velocidad V; poseerá una fuerza representada por  $MV^2/2$ , una vez dentro del receptor, el agua hace mover y sigue el movimiento del receptor y llega hasta el nivel inferior después de haber recorrido la altura h, por tanto su trabajo gravimétrico será:

$$P_{V_1} = P \cdot h \quad (9)$$

Siendo:  $P_{V_1}$  = Trabajo realizado por el agua en función de su energía potencial (F.L.).

P = Peso del agua alojada en la rueda (M.g.).

si a  $P_{V_1}$  sumamos la energía que contenía el agua inicialmente ( $MV^2/2$ ), tendremos el trabajo total desarrollado por el agua en el receptor será:

$$P_t = 1/2 M \cdot V^2 + M \cdot g \cdot h \quad (10)$$

Cuando el agua choca con los elementos del receptor, éstos tienen normalmente una velocidad menor que la del agua, ocurre entonces un choque y por consiguiente una pérdida de energía del agua, si U es la disminución de velocidad sufrida por el agua, la pérdida de energía del agua por el choque será:

$$P_{V_2} = 1/2 M \cdot U^2 \quad (11)$$

Siendo:  $P_{V_2}$  = Energía o trabajo perdido por el choque.

M = Masa del agua.

$U^2 =$  Disminución de velocidad sufrida por el agua, igual a  $V - v$  o sea a la diferencia entre la velocidad del agua al entrar y la velocidad tangencial de la máquina o receptor.

Al salir del receptor, el agua está a cierta velocidad  $W$  por tanto con una energía  $MW^2/2$  y que representa un trabajo negativo o perdido.

El trabajo útil, es decir, el trabajo transmitido en su eje de salida por el receptor está representado por un peso  $P$  aplicado tangencialmente al receptor y que se mueve a una velocidad  $v$ , igual a la del receptor, dicho trabajo será  $P.v$ .

Al establecer la ecuación de equilibrio, se tendrá:

$$1/2 MV^2 + Mgh = P.v + 1/2 M.U^2 + 1/2 MW^2 \quad (12)$$

de donde:  $P.v = 1/2 Mv^2 + Mgh - 1/2 MU^2 - 1/2 M.W^2 \quad (13)$

La ecuación (13) es la fórmula general que expresa el trabajo total desarrollado por una rueda o receptor hidráulico.

Reemplazando en (13) a  $V^2$  por  $2g.h'$  tendremos:

$$Pv = 1/2 M.2gh' + Mgh - 1/2 MU^2 - 1/2 MW^2 \quad (14)$$

$$= Mg(h' + h) - 1/2 M(U^2 + W^2) \quad (15)$$

Si hacemos:  $h' + h = H$ , tendremos:

$$Pv = MgH - 1/2 M(U^2 + W^2) \quad (16)$$

De donde se puede deducir que  $Pv$  será máximo cuando  $1/2 M(U^2 + W^2)$  sea 0, o sea cuando  $U = 0$  y  $W = 0$ , o sea cuando el agua no choca al entrar y cuando la velocidad de salida sea igual a la tangencial de la rueda.

1.2.1.3 Velocidad perdida por el agua al entrar o chocar con una rueda hidráulica: (Ver Figura 9). Si es  $V$  la velocidad de llegada del agua al álabe y  $a$  el ángulo que forma la dirección de la vena fluida con el álabe,  $v$  la velocidad con que gira el álabe y  $b$  el ángulo entre el álabe y su dirección, al descomponer cada una de estas velocidades en sus componentes horizontales y verticales graficadas vectorialmente como  $\vec{V}_n$  y  $\vec{m}_n$  - y  $\vec{m}_r$  y  $\vec{r}_v$  tendremos:

$$\vec{V}_n = V.\text{sen } a \quad (17)$$

$$\vec{m}_r = v.\text{sen } b \quad (18)$$

$$\vec{m}_n = V.\text{cos } a \quad (19)$$

$$\vec{r}_v = v.\text{cos } b \quad (20)$$

Las componentes  $V \text{ sen } a$  y  $v \text{ sen } b$  están dirigidas en el mismo sentido, por tanto, cuando  $V \text{ sen } a$  es mayor que  $v \text{ sen } b$ , esta diferencia de velocidad se pierde y el ren-

diminuto de la rueda disminuye. Para evitar esto, es preciso que ambas velocidades sean iguales, variando bien la velocidad del agua o la tangencial del cangilón.

1.2.1.4 Velocidad con que el agua llega al álabe: las dos componentes en el sentido del álabe son  $m \cdot n = V \cos a$  y  $rv = v \cdot \cos b$  y la diferencia  $V \cos a - v \cos b$  es la velocidad con que el agua resbala sobre la superficie del álabe.

1.2.1.5 Velocidad del agua al abandonar el álabe: Ver Figura 10. Cuando el agua entra en los álabes de ciertos receptores cuyas formas adecuadas no alteran bruscamente su velocidad, circula por ellos y llega a su extremo con una velocidad  $U'$  en sentido de la tangente al último elemento, además que se desplaza a la velocidad tangencial que lo hace el álabe; si representamos por  $mu'$  la velocidad del agua en el álabe y por  $mv'$  la velocidad del álabe tangencialmente a la circunferencia de la rueda, y construimos el paralelogramo con estas velocidades, obtendremos la resultante  $mw$  que es la velocidad de salida absoluta con que el agua abandona el elemento. Analizando la Fig. 10 vemos que  $mw$  será menor cuanto más se aproxime el último elemento del álabe a la tangente de la circunferencia de la rueda o sea cuando el ángulo entre  $u'$  y  $v'$  se acerque más a  $180^\circ$

### 1.3 RUEDAS HIDRAULICAS

Las ruedas hidráulicas de eje horizontal que son las más comunes, se dividen en:

1.3.1 Ruedas con agua por debajo.

1.3.2 Ruedas con agua de costado o de lado.

1.3.3 Ruedas con agua por encima.

Todas las anteriores se componen de las siguientes partes: Ver Figura 11.

- Canal de entrada A con sus compuertas o vertederos.
- La rueda R propiamente dicha y su saetín (C).
- El canal de desagüe B.
- El alveo (D).

#### 1.3.1 Ruedas con agua por debajo. Ver Figura 11.

El agua que escapa por la abertura (V) de la compuerta pega contra los álabes inferiores e impulsa a la rueda R. Con el fin de utilizar en la mejor forma posible la potencia hidráulica se encaja la parte inferior de la rueda en un canal. Según la forma de los álabes, esta clase de rueda se clasifica en:

1.3.1.1 Rueda de paletas planas.

1.3.1.2 Rueda de paletas curvas o de Poncelet.

1.3.1.3 Rueda Colgante.

1.3.1.1 Rueda de paletas planas: son las más antiguas y sencillas. Se componen

de una o dos llantas (anillos) iguales y paralelos entre las cuales se fijan las paletas planas. Según Poncelet, el espesor de las paletas debe ser de 2 ó 3 cm. y su longitud de 30 - 40 cm. en dirección radial y con separaciones iguales entre sí. Algunos Ingenieros recomiendan que la longitud de la paleta, sea entre 2 y 3 veces la abertura vertical de la compuerta, y su separación medida en la circunferencia que pasa por su centro de gravedad un valor de 1.5 veces la longitud. El diámetro de la rueda tiene un rango entre 3 y 5 mts. El ancho de la rueda depende de la corriente de agua a usar. El número de radios que unen las llantas al centro será de 4, 6 u 8 máximo. El canal lateral tendrá una holgura de 1 a 2 cm. a lado y lado de la rueda con una pendiente en su base de 1/8 a 1/15. La profundidad del agua en el canal no debe exceder de 1/3 a 1/4 de la longitud radial de la paleta. Ver Figura 12.

El mecanismo de la compuerta, generalmente vertical, está dispuesto a cierta distancia de la rueda, siendo esta distancia la mínima posible.

#### 1.3.1.1.1 Efecto útil de una rueda de paletas planas:

Nomenclatura:

P: esfuerzo medio ejercido por el agua en la circunferencia media de la parte sumergida de la paleta.

V: velocidad del agua en el momento de chocar contra la paleta.

v: velocidad del líquido en el punto de aplicación de P.

M: la masa de agua/segundo que pasa por el canal.

Debido a que el agua choca con la paleta y se separa de ella a la misma altura, el factor  $h$  que aparece en la ecuación (13) será igual a 0 y  $Mgh$  será nulo. Por tanto, la ecuación particular para este tipo de rueda será:

$$Pv = \frac{1}{2} M \cdot V^2 - \frac{1}{2} M \cdot U^2 - \frac{1}{2} M \cdot W^2 \quad (21)$$

A partir del momento del choque la paleta y el agua avanzan juntas y por tanto, a la misma velocidad. igual a  $v$  y menor que  $V$ ; la pérdida sufrida a causa del choque será  $(V - v) = U$ , y como la velocidad de salida del agua es igual a la de la rueda, tendremos:  $W = v$ . Reemplazando en la ecuación (21), tendremos:

$$Pv = \frac{1}{2} M V^2 - \frac{1}{2} M (M-v)^2 - \frac{1}{2} M v^2 = M(V-v) v \quad (22)$$

Si hacemos:  $M = \frac{1.000 Q}{g}$ , siendo  $Q = m^3/\text{seg.}$  de agua, tendremos:

$$Pv = \frac{1.000 Q}{g} (V - v) v. \quad (23)$$

1.3.1.1.2 Condiciones para máxima eficiencia: analizando la ecuación (23), tenemos que el trabajo  $P \cdot v$  será máximo cuando el factor  $(V - v)v$  sea máximo, ya que  $\frac{1.000 Q}{g}$  es cte, por tanto, haciendo  $(V - v)v$  máximo, tendremos que  $(V - v)$  debe ser igual a  $v$  para que su producto sea máximo o sea que:

$$(V - v) = v \text{ o } V = 2v \quad (24)$$



Reemplazando a  $v = V/2$  en la ecuación (23), tendremos:

$$P_v = \frac{1.000 Q}{g} \left( V - \frac{V}{2} \right) \frac{V}{2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1.000 Q}{g} \cdot V^2 \quad (25)$$

Como:  $V^2 = 2gh'$ ;  $P_v = \frac{1}{4} \cdot \frac{1.000 Q}{g} \cdot 2 \cdot g \cdot h' = \frac{1}{2} \cdot 1.000 Q \cdot h'$ , si  $h' = H$ , tendremos:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot 1.000 Q \cdot H \quad (26)$$

en la cual:  $P_v$ : Potencia en Kg - mt/seg.

$\frac{1}{2}$ : Eficiencia = 50%

$Q$ : Caudal en  $mt^3$ /seg.

$H$ : Altura en mt, medida desde la superficie libre del canal hasta el centro del orificio de descarga del agua.

Si se analiza la fórmula (26) se notará que la máxima eficiencia de esta rueda es del 50%, o sea que su utilización es muy desventajosa como máquina hidráulica pues además deberán descontarse pérdidas de eficiencia por fugas laterales de agua en la rueda y su canal lateral.

### 1.3.1.1.3 Resumen de las condiciones que debe cumplir una rueda plana:

- La velocidad tangencial de la circunferencia de la rueda tendrá un valor de 2/5 de la velocidad de entrada del agua al chocar con la paleta.
- Caída máxima del agua 1.50 metros; por encima de este valor el choque es violento por exceso de velocidad y las pérdidas laterales de agua aumentan.
- El diámetro de la rueda puede fluctuar entre 3 a 10 metros, sin que su rendimiento disminuya apreciablemente.
- La velocidad de la pala medida en el tercio del ancho de la pala contado a partir de un borde debe ser igual por lo menos a 1 mt/seg.
- La pala en su posición vertical, ha de sumergirse una porción igual, por lo menos a los 2/3 del espesor de la lámina de agua.
- La altura de las palas más conveniente, está comprendida entre 2 y 3 veces la altura vertical del orificio de salida de la compuerta del agua.
- La distancia entre dos palas consecutivas, medida entre sus líneas de inmersión, no debe exceder 1.5 veces la altura de las mismas.
- Entre la pala y las paredes y el fondo del canal ha de quedar libre un juego de 2 cm.

### 1.3.2 Ruedas por debajo de paletas curvas (Poncelet).

#### 1.3.2.1 Características generales:

- Utilizan sólo 1/3 de la potencia total del agua que las mueve.
- Pueden funcionar a altas velocidades.
- Ocupan poco espacio.
- Construcción sencilla.

En 1827, Poncelet modificó la rueda de paletas rectas por paletas curvas con el objeto de obtener un rendimiento mayor sin sacrificar ninguna de las ventajas que tenía la recta. Partiendo del principio deducido de la ecuación general, o sea que para obtener el máximo absoluto de efecto útil, el líquido debe penetrar en los álabes sin choque y salir de ellos a la misma velocidad de la rueda, cambió las paletas planas por álabes curvos dispuestos casi tangencialmente a la circunferencia exterior. El fondo del depósito superior es horizontal y se enlaza con la parte rectilínea del saetín, comprendido entre el orificio y la rueda. Para atenuar los efectos de la contracción, los lados verticales están formados por porciones redondeadas, la compuerta está inclinada en la proporción de 1 de base por 2 de altura y si es posible 1:1. El saetín cuya pendiente es 1/10 a 1/15, es tangente a la circunferencia exterior de la rueda; casi siempre, a partir del punto de contacto, le sigue una porción circular, concéntrica a la rueda, con una longitud de arco superior en 5 a 6 cm. a la distancia entre 2 álabes consecutivos. Este arco de círculo, en que encajan las paletas al llegar al extremo inferior de su carrera (Figura 13), termina en una hondura de 0.30 a 0.40 mts. cuyo vértice está al nivel de las aguas medias del canal de salida con objeto de facilitar la expulsión del agua que pasó por la rueda. Las paletas están unidas a dos coronas situadas en dos planos verticales paralelos, cuya distancia excede en 6 a 10 cm. del ancho del orificio. La separación en la circunferencia exterior es de 25 a 30 cm. entre cangilones y la mínima distancia debe ser menor que la abertura mínima de la compuerta que normalmente es de 20 a 30 cm. Su número es de 36 ruedas de 3 a 4 metros de diámetro y de 48 para las de 6 a 7 mts. de diámetro; el espesor de los cangilones es variable pero su borde debe ser adelgazado (biselado a fin de que ofrezcan un buen filo a la lámina de agua que llega a ellos.

#### 1.3.2.2 Teoría de las ruedas Poncelet: Tomando la ecuación general:

$$(13) \quad P_v = \frac{1}{2} M.V^2 + M.g.h - \frac{1}{2} M.U^2 - \frac{1}{2} M.W^2, \text{ tenemos:}$$

El término  $M.g.h$  desaparece puesto que la rueda recibe el agua por debajo y queda:

$$P_v = \frac{1}{2} M.V^2 - \frac{1}{2} M.U^2 - \frac{1}{2} M.W^2 \quad (27)$$

Si consideramos que la paleta es tangente a la circunferencia de la rueda y el filete fluido que llega tangencialmente a la rueda y por tanto a la paleta, tenemos que la velocidad del agua ( $V$ ) y la de la rueda ( $v$ ) están dirigidas en el mismo sentido, puesto que la tangente es común a la paleta y a la circunferencia de la rueda; no ocurre, pues choque y la velocidad  $u = 0$ , la ecuación (27) se transforma en:

$$P_v = \frac{1}{2} M.V^2 - \frac{1}{2} M.W^2 \quad (28)$$

El agua entra al álabe sin chocar y la velocidad en el álabe es  $(V - v)$  y el agua resbalará por la paleta y ascenderá por ella hasta que las fuerzas de la gravedad y centrípeta reduzcan su velocidad hasta 0 (cero), entonces en virtud de las mismas fuerzas antes anotadas, el agua volverá a bajar, resbalando sobre la paleta con movimiento uniformemente acelerado, y al llegar al extremo inferior habrá recuperado la misma velocidad que poseía al entrar disminuida por la resistencia al deslizamiento sobre la paleta.

La velocidad de salida del agua será  $(V - v)$  en sentido opuesto al movimiento de la rueda, pero como la rueda tiene una velocidad  $(v)$ , la velocidad real de salida del agua será  $(V - v - v) = (V - 2v)$ ; al reemplazar a  $W$  en (28) por  $(V - 2v)$ , tendremos:

$$P_v = \frac{1}{2} M \cdot V^2 - \frac{1}{2} M (V - 2v)^2 - 2 M (V - v) v \quad (29)$$

Si comparamos la ecuación (29) con la ecuación (22), se notará que el trabajo teórico desarrollado por la rueda Poncelet es el doble del desarrollo por la de paletas planas.

Para obtener la máxima eficiencia en la rueda Poncelet es necesario que el producto  $(V - v) v$  sea máximo o en otros términos que  $(V - v) = v$  o  $V = 2v$ , o  $v = \frac{V}{2}$ . Si reemplazamos en la ecuación (29)  $v$  por  $\frac{V}{2}$ , tenemos:

$$P_v = 2M \left( V - \frac{V}{2} \right) \frac{V}{2} = \frac{1}{2} M \cdot V^2$$

reemplazando  $V^2$  por  $2gH$ , tendremos:

$$P_v = \frac{1}{2} M (2gH) = M \cdot g \cdot H = \frac{1.000 Q}{g} \cdot g \cdot H = 1.000 QH \quad (30)$$

Los resultados expresados por la ecuación (30) son teóricos debido a 2 aspectos que en la práctica no pueden realizarse:

- Es para una vena delgada de agua, en la realidad el espesor de la vena es mayor.
- Es para una paleta tangente a la circunferencia de la rueda pero en la realidad esto es imposible pues el agua chocaría contra la convexidad inferior de la paleta y el espacio entre paleta y paleta sería muy estrecho en la realidad, la paleta hace ángulo entre  $25^\circ$  y  $30^\circ$  con la circunferencia de la rueda.

En la realidad, el rendimiento baja a un 60 - 65%, y la velocidad real de la rueda es mejor que sea 0.55 de  $V$  que 0.50 que muestra la teoría.

Para saltos de agua de 2 mts. o más y aberturas de compuerta entre 8 y 12 cm. el efecto útil práctico es igual a 0.65 del efecto útil teórico, por tanto:

$$P_v = 0.65 \cdot 2M (V - v) v = 0.65 \cdot \frac{2.000 Q}{g} (V - v) v, \text{ o sea:}$$

$$P_v = 132,52 \cdot Q (V - v) v \quad (30)A$$

y para el máximo efecto, se tendrá:

$$P_v = 0.65 M.g.H = 0.65 \cdot 1.000 Q.H = 650 Q.H \quad (31)$$

Cuando el salto es de 1.50 mts. de altura y la cobertura de la compuerta entre 0.20 y 0.30 mts. el efecto útil real es 0.75 del efecto teórico; o sea:

$$P_v = 152.9 Q (V - v) v \quad (32)$$

$$P_v = 0.75 M.g.H = 750 Q.H \quad (33)$$

Para obtener la fuerza promedio ejercida en la circunferencia externa de la rueda, tomamos las ecuaciones (30A) (31) (32) y (33) y despejamos P, así:

$$P = 132.52 Q (V - v) \quad (34)$$

$$P = \frac{650 Q.H}{v} \quad (35)$$

$$P = 152.9 Q (V - v) \quad (36)$$

$$P = \frac{750 Q.H}{v} \quad (37)$$

1.3.2.2.1 Trabajo de las ruedas de paletas curvas: Ver figura 14. Poncelet introdujo muchas modificaciones al trazado de las paletas. Su nuevo trazado es así:

- El resalto AR debajo de la rueda, en lugar de estar situado detrás de la vertical que pasa por O, se encuentra adelante, a una distancia RN, tanto más considerable cuanto mayores son el radio de la rueda y la altura del salto; dicha distancia puede ser de 0.30 mts. para ruedas de 1.50 metros de radio y para los saltos pequeños, y de 0.40 a 0.45 metros para ruedas de más de 3 m. de diámetro a saltos de más de un metro. Determinado el borde A del resalto, se traza el arco del círculo AB cuya longitud excede en 0.05 m. a la distancia comprendida entre dos paletas consecutivas.
- El fondo del canal entre el punto B y el orificio de salida del agua: debe ser una curva y no plano, esta curva se traza así: Por el punto B se traza una recta BC que forme con el radio OB un ángulo de 25° por encima, por el mismo punto B se traza la tangente Bb a la circunferencia exterior de la rueda, y sobre esta tangente se toma una longitud "discrecional" Bb.

Por el mismo punto B, todavía, se traza la perpendicular Bd a BC y con centro en B y radio igual a 2 Bb, se traza un arco de círculo que cortará a be, paralela a Bd, en el punto e; unimos el punto B al punto e, y esta línea Be indicará la dirección que habrá que dar a la velocidad V del agua para que el líquido llegue sin chocar al primer elemento de la curva de la paleta que tiene su centro sobre la línea BC.

- Trazado del saetín: determinada ya la dirección del filete que alcanza al primer elemento de la curva, hay que conseguir que todos los filetes que forman la vena fluida del agua, lleguen al encuentro de la circunferencia exterior de la rueda formando el mismo ángulo, lo cual no sucedería si se diese al saetín un fondo plano. He aquí como se procede:

Por el punto B, se traza la recta BE perpendicular a Be, sobre la recta Be, se baja

desde O la normal OE y se describe la circunferencia de radio OE; se desarrolla esta circunferencia partiendo del punto E, y el punto B de la tangente EB describe la curva del fondo del saetín; la sección de dicho fondo es entonces una evolvente del círculo.

Todos los filetes de la vena líquida describirán evolventes del círculo paralelas a la curva del fondo y cortarán la circunferencia de la rueda y por tanto el borde de las paletas, bajo el mismo ángulo.

Trazado el fondo del saetín, éste se enlaza a la parte baja del orificio, así:

- Se toma sobre la circunferencia de radio OE y a partir del punto E, un arco EF igual en longitud a la altura del orificio o espesor de la vena de agua;
- Se traza la tangente FG al círculo de radio OE; esta tangente determina el punto G, en que el filete superior encuentra a la circunferencia exterior de la rueda, y para que esto suceda, es preciso que el fondo del saetín esté suficientemente prolongado por el lado de arriba, para que la vena fluida haya tomado bien la dirección de la evolvente antes de llegar al punto G; es necesario, entonces, prolongar el saetín desde H hasta I, en 0.20 a 0.25 metros por lo menos. El enlase con la parte baja del orificio se realiza a partir del punto I.
- Por el punto I, se traza la tangente al círculo desarrollado de radio OE.
- Se baja la perpendicular IK a la tangente MI que corta al fondo KL del canal en el punto K.
- se divide el ángulo IKL en dos ángulos iguales mediante la recta MK, que corta a la tangente MI en el punto M. Este punto M es el centro del arco de círculo, que descrito con el radio MI, enlaza el fondo del saetín al borde inferior del canal de entrada.

### 1.3.3 Ruedas colgantes sobre barcas.

Estas ruedas son análogas a las de paletas planas, se montan sobre 2 barcas que sostienen su eje.

- La altura de las paletas es igual a  $1/4$  ó  $1/5$  de su radio exterior.
- La paleta se sumerge completamente en el río para buscar la máxima velocidad del agua que no es en la superficie.
- La longitud de las paletas crece casi proporcionalmente al trabajo que se desea obtener.
- Ordinariamente, su número de paletas es 12 y es conveniente aumentarlos hasta 18 y 24 (Figura 15).

Se aconseja respecto a las paletas:

- Hacer la altura igual al intervalo entre 2 consecutivas.
- Hacer su número hasta 20 mínimo.

- Inclinárlas con respecto al radio de tal manera que su prolongación forme un ángulo de  $30^\circ$  si la rueda se sumerge hasta  $1/4$  de su radio, o  $15^\circ$  si se sumerge hasta  $1/3$  del mismo (máxima inmersión posible).
- El máximo efecto útil teórico se obtiene cuando:

$$V - v = v \text{ o sea } v = \frac{V}{2}$$

- El máximo efecto útil experimental:

$$v = 0.4 V.$$

### 1.3.4 Ruedas de lado:

Se dividen en:

1.3.4.1 Ruedas de paletas planas encajadas en un canalizo: Estas ruedas reciben el agua por debajo del eje. Están construidas como las ruedas por debajo, de paletas planas, con la diferencia de que en estas ruedas de lado la paleta es con frecuencia poligonal, (ver Figura 16) y se hallan encajadas en un canalizo de radio superior en 0.01 metros al de la rueda, y que termina en una hondura ligera o en un plano inclinado de pendiente  $1/12$ .

**Nota:** Con el fin de facilitar la evacuación del aire comprimido entre el álabe al entrar el agua, se hacen perforaciones pequeñas en el fondo de los álaves.

Existen dos clases de ruedas de lado y se diferencian en la forma como reciben el agua, así:

Tipo A: El agua que reciben sale por un orificio cuya abertura se gradúa mediante una compuerta B (Figura 17).

Tipo B: El agua que reciben se almacena en A y se vierte mediante una compuerta de cremallera B que se baja o sube (Figura 18). Este último sistema da mejor resultado en cuanto a la eficiencia de la rueda.

1.3.4.2 Efecto útil de la rueda de lado tipo B: Para obtener la expresión del efecto útil teórico, se parte de la ecuación general (13), así:

$$P.v = \frac{1}{2} M.V^2 + M.g.h - \frac{1}{2} M.U^2 - \frac{1}{2} M.W^2 \quad (13)$$

En la Figura 19.  $xx'$  representa la curva parabólica descrita por el filete medio del agua que recibe una rueda de lado tipo B, el punto a, será el punto de entrada del agua, V la velocidad de entrada del agua y su representación en magnitud será  $\overline{am}$ , tomada sobre la tangente a la parábola en el punto a; esta magnitud  $\overline{am}$  se descompone en otras dos:  $\overline{an}$  tangente a la circunferencia de la rueda y  $\overline{ap}$  normal, o sea en la dirección del centro O. Se designa por el ángulo formado por la tangente  $\overline{an}$  a la rueda y la recta  $\overline{am}$  a la parábola.

Al analizar el triángulo rectángulo mna, tendremos:

$$na = V \cos \alpha \quad ; \quad ap = V \sin \alpha$$

Siendo  $V \cos \alpha$  la componente en el sentido an y  $v$  la velocidad de la rueda, resultará que el agua, al marchar con la misma velocidad de la rueda, habrá perdido una parte de su propia velocidad, representada por  $(V \cos \alpha - v)$ . La velocidad perdida por el agua en su introducción será pues la resultante de las componentes  $(V \cos \alpha - v)$  y  $(V \sin \alpha)$  o sea la hipotenusa de un triángulo rectángulo cuyos catetos son las dos componentes anteriores; o sea:

$$U^2 = (V \cos \alpha - v)^2 + V^2 \sin^2 \alpha = V^2 + v^2 - 2 \cdot V \cdot v \cdot \cos \alpha \quad (37)$$

Sustituyendo  $U^2$  por este valor en la ecuación general (13) y asumiendo que el agua al salir del receptor posee una velocidad sensiblemente igual a la de la rueda, dicha ecuación se transformará en la siguiente:

$$P \cdot v = 1/2 M \cdot V^2 + M \cdot g \cdot h - 1/2 M (V^2 + v^2 - 2 \cdot V \cdot v \cdot \cos \alpha) - 1/2 M v^2 \quad (38)$$

$$P \cdot v = M \cdot g \cdot h + M V \cdot v \cos \alpha - M v^2 = M g h + M (V \cos \alpha - v) v \quad (39)$$

Al igual que en las ruedas con agua por debajo, en las de lado, para lograr que el trabajo sea el máximo posible, es preciso que el producto  $(V \cos \alpha - v) v$  sea máximo también, lo cual implica la igualdad de los dos factores, así:

$$V \cos \alpha - v = v \quad \text{o sea} \quad v = \frac{V \cos \alpha}{2}$$

Es evidente que el efecto útil aumentará a medida que disminuya el ángulo  $\alpha$  de las velocidades. Si  $\alpha = 0$  caso en el cual la velocidad del líquido fuente esté dirigida según la velocidad del punto en que alcanza la rueda:

Si  $\alpha = 0$   $\cos \alpha = 1$  y  $v = \frac{V}{2}$ , al reemplazar este valor de  $v$  en la ecuación (39), se obtiene:

$$P \cdot v = M \cdot g \cdot h + \frac{M V^2}{4} \quad (40)$$

Si designamos por  $h'$  la altura a que se debe la velocidad  $V$ , es decir, la distancia vertical comprendida entre el punto de introducción y el nivel del agua en el depósito superior, tendremos:

$$V^2 = 2gh' \quad \text{o sea} \quad P \cdot v = M \cdot g \cdot h + \frac{2 \cdot M g h'}{4} = M g \left( h + \frac{h'}{2} \right) \quad (41)$$

Esta fórmula muestra que aún en las condiciones más favorables, el trabajo teórico es siempre menor que el trabajo absoluto del agua..

Siendo  $H$  la altura total del salto, tendremos:

$$H = h + h' \quad \text{o sea que} \quad h + \frac{h'}{2} < H$$

Si  $h' = 0$  tendremos que  $V = 0$  y  $v = 0$ , es decir, la rueda no girará, por tanto, la condición  $h' = 0$  es irrealizable.

De lo anterior, se deduce que el trabajo teórico de la rueda aumentará a medida que

el valor de  $h'$  disminuya, o en otros términos, que para una rueda de las llamadas de lado, debe tomarse el agua lo más cerca posible del nivel superior del depósito y por consiguiente convendrá utilizar una compuerta de vertedero y dar a la rueda poca velocidad.

#### 1.3.4.3 Fórmulas prácticas:

1.3.4.3.1 La velocidad de la rueda puede variar entre  $v = 0,30V$  y  $v = V$  sin que el efecto útil discrepe sensiblemente del máximo relativo. Generalmente, se hace  $v = 0.70 V$ . Los fabricantes dan a esta velocidad un valor de 1.50 mts/seg., hasta un máximo de 2.0 mts/seg.

1.3.4.3.2 Experimentalmente se ha demostrado que los cangilones, no se llenan sino máximo la  $1/2$  ó  $2/3$  de su capacidad total y que cuando esta situación ocurre, los coeficientes de corrección son: 0.797 para las ruedas que reciben el agua de compuertas de vertedero y de 0.750 cuando el agua sale por orificios con carga.

1.3.4.3.3 Cuando se excede el límite de velocidad de 2 mts/seg., se usará un coeficiente de corrección 0.60.

1.3.4.3.4 En la práctica, se usarán 3 fórmulas que se han derivado de las teóricas antes deducidas:

$$P.v = M.g.h + M (V\cos\alpha - v)v = 1.000Q\left[h + \frac{(\cos\alpha - v)v}{g}\right] \quad (42)$$

$$P.v = 797 \text{ ó } 750 \text{ ó } 600 Q \left[ h + \frac{(V\cos\alpha - v)v}{g} \right] \quad (43)$$

#### 1.3.5 Ruedas hidráulicas de nivel constante (Sagebien).

Estas ruedas funcionan por simple presión del agua, el nivel en el álabe que recibe el líquido, es igual al del canal de entrada. Figura 20. Para que esta condición se realice, la pala que recibe el líquido ha de formar, por su plano superior, un ángulo de  $135^\circ$  con el nivel superior del agua. Este sistema es ventajoso pues el agua actúa sin choque y la velocidad del agua a la salida es la misma que a la entrada. Estas condiciones no se cumplen cuando la rueda gira a mayor velocidad que el agua; disminuyendo mucho el rendimiento de la rueda. En condiciones normales de trabajo, esta rueda es más ventajosa que todas las demás, alcanzando rendimientos hasta del 86% cuando la velocidad de la rueda es la mínima posible. Esta rueda funciona bien en corrientes de agua de nivel variable.

El rendimiento tan alto conseguido en las ruedas Sagebien, se debe a lo siguiente:

- No hay pérdida por salto del agua.
- El agua se deposita gradualmente en el canal inferior sin dar origen a remolinos.
- Las pérdidas por fricción en los rodamientos es mínima debido a la baja velocidad de la rueda.

Otras características de esta rueda son:



- Caudal óptimo requerido: 600 a 700 litros/segundo - metro ancho de la rueda.
- Su baja velocidad hace necesario sistemas (costosos y que consumen mucha energía) de transmisión con K muy altas. Ej. Una rueda con un diámetro de 12 mts. girará sólo a  $1^{3/4}$  R.P.M.
- El saetín presenta la misma forma que en las ruedas de lado ordinarias.
- Para evitar su aceleración deben tener sistema de freno y/o regulador que actúe sobre la compuerta y/o el eje.

### 1.3.6 Ruedas de cangilones con agua por encima. Ver Figura 21.

Estas ruedas se usan generalmente para aprovechar grandes saltos de agua. Se componen de dos coronas circulares, unidas interiormente por un fondo cilíndrico o tambor que comprenden las paletas poligonales o curvas que reciben el agua por la parte superior y la conservan hasta alcanzar la parte inferior de la carrera. La forma de los cangilones es muy variable.

1.3.6.1 Efecto útil de una rueda de cangilones: Independiente de la forma de los cangilones, el agua al entrar al cangilón pierde su velocidad relativa y conserva la misma velocidad de la rueda.

Si llamamos  $\alpha$  el ángulo de las dos velocidades, una de las cuales es tangente a la parábola descrita por el filete fluido y la otra tangente a la rueda (ver Figura 19), se tendrá:

$$U^2 = V^2 + v^2 - 2.V.v. \cos \alpha \quad (44)$$

introduciendo esta ecuación en la ecuación general (13), tendremos:

$$P.v = M.g.h + 1/2 . M.V^2 - 1/2 M(V^2 + v^2 - 2.V.v. \cos \alpha) - 1/2 MW^2 \quad (45)$$

Cuando el agua penetra en el cangilón toma la velocidad de la rueda o sea que  $W = v$ , por tanto:

$$P.v = M.g.h + 1/2 . M.V^2 - 1/2 M.V^2 - 1/2 Mv^2 + MV.v. \cos \alpha - 1/2 M.v^2 =$$

$$= 1.000 Q \left[ h + \frac{(V \cos \alpha - v)v}{g} \right] \quad (46)$$

$$P.v = M.g.h + M (V \cos \alpha - v)v \quad (46A)$$

Igual que en las ruedas anteriores, para obtener el máximo efecto útil, es preciso que:  $V \cos \alpha - v = v$  de donde:  $v = \frac{V \cos \alpha}{2}$

Cuando  $\alpha = 0$  valor que corresponde al caso más favorable, tendremos  $v = \frac{V}{2}$  y al introducir este valor en la ecuación (46A), tendremos:

$$P.v = M.g.h + M \left( V - \frac{V}{2} \right) \frac{V}{2} = M.g.h + \frac{MV^2}{4} \quad (47)$$

Si llamamos  $h'$  a la altura que origina la velocidad  $V$ , o sea a la distancia del punto de introducción del agua a la rueda hasta el nivel superior del agua, tendremos:

$$V^2 = 2.g.h'$$

$$P.v = Mgh + 2 \frac{M.g.h'}{4} = M.g.h + \frac{M.g.h'}{2} = M.g. \left( h + \frac{h'}{2} \right) \quad (47A)$$

Pero  $H = h + h'$ ; luego situándose teóricamente en el caso más favorable, es imposible que se pueda obtener un rendimiento igual al trabajo disponible. Si hacemos  $h' = 0$ , obtendremos  $h = H$ , pero en este caso puramente ideal,  $V = 0$  y lo mismo sucederá para la velocidad de la rueda.

En conclusión, el efecto útil será mayor, cuanto más cerca esté el punto de introducción del agua a la rueda y el nivel del agua en el depósito superior. Es ventajoso hacer llegar el agua a la parte superior de la rueda, pero el movimiento de ésta será lento.

1.3.6.2 Fórmulas prácticas: Experimentalmente, se ha demostrado lo siguiente:

- Cuando los cangilones están llenos hasta la mitad de su capacidad y la velocidad en la circunferencia exterior no es superior a 2 m/seg., se obtiene un efecto útil hasta 1/20.
- La relación entre las velocidades de la rueda a la velocidad del agua pueden variar entre 0.30 a 0.80 sin que el efecto útil se modifique notablemente.
- La relación entre efecto útil generado por estas ruedas y el trabajo disponible de salto de agua, es de 0.65 a 0.70.
- Cuando los cangilones se llenan más de la mitad de su capacidad, el coeficiente de corrección del término  $M.g.h$  es de 0.65 y baja hasta 0.60.
- Para efectos de cálculos se pueden usar las siguientes fórmulas:

$$P.v = 0.78 \text{ a } 0.65 \times 1.000 \times Q.h + \frac{1.000 Q}{g} (V \cos \alpha - v)v \quad (48)$$

1.3.6.3 Construcción de rueda con agua por encima.

1.3.6.3.1 Cangilones: Deben tener tal forma que den acceso fácil al agua, reduciendo a un mínimo el choque y que la retengan el máximo posible ( $180^\circ$ ). Si no se pone guarda a la rueda (Figura 22) el agua empezará a derramar al llegar el cangilón a un punto  $j$ , y se vacía antes de llegar abajo y el efecto sería el mismo que se obtendría si toda el agua se vertiera en un punto  $q$  intermedio entre  $j$  y el nivel  $k$ ; la altura  $qk$ , debajo del punto medio del derrame, se pierde completamente, lo que se evita con la guarda  $ss$ . La profundidad  $d$  de los cajones, debe ser pequeña para que el agua recorra la menor distancia posible al entrar en ellos. El ancho de los cajones se calcula de modo que éstos no se llenen completamente, para que el derrame empiece bien abajo y se reduzca así la pérdida de carga.

Dado un gasto, la cantidad de agua por cajón disminuye a medida que aumenta la velocidad  $v$ , y si ésta es grande, será necesario mayor carga en el depósito para que la

vena de agua salga con la suficiente velocidad, pero debido a la inercia de la velocidad alta, el agua tenderá a salirse de los cangilones.

1.3.6.3.2 Trazado de los cangilones: En la figura 23 se ve un método para dibujar las paletas en hierro y madera para ruedas de agua por encima. La explicación que se da a continuación se aplica en:

- Para hierro: sea C.E.F.G un trazo de corona de la rueda y A la boca del saetín, d el ancho del aro.
- Se traza la línea AB, eje del chorro de agua entrante. Esta curva es una parábola. Con el eje de la rueda como centro y un radio  $R = \frac{D}{2}$ , se traza el arco CE, que corta a la parábola en a; de modo que e es la mitad del espesor de la capa de agua entrante, más el espesor del saetín, más el espacio entre éste y la corona.
- Haciendo centro en el mismo lugar, trácese el arco FG con el radio  $R - d$ , esto será la circunferencia de la cara de la llanta de la rueda.
- Desde el punto b en que FG corta a la parábola AB, se traza la recta Ab y se señala el punto a' en que ésta corta a CE.
- Con b como centro y d como radio, se traza el arco mc que corta a FG en c y se traza cf, que es una prolongación del radio de FG.
- Se traza el arco a'f, cuyo centro se halla levantando una perpendicular en el punto medio de a'f y cortándola desde a' o f con un radio  $r = a'b$ .
- Se hace  $cg = \frac{1}{2} l$  siendo l la distancia entre a y a'.
- Se traza gh parábola a cf y por último,
- Se une la curva a'f a la línea gh por medio de un arco cuyo radio sea igual a L. Así, a'g es el contorno de una paleta.
- El paso t se halla dividiendo la circunferencia de la rueda por el número de cangilones.
- El paso t' entre las paletas en el fondo de la llanta se obtiene dividiendo la circunferencia de la llanta por el número de cangilones.
- Para madera: Nótese que en la construcción de la rueda de madera que muestra la sección (b) Figura 23, los puntos a'b, y g, corresponden a los a', h y g de la sección (a) y en (b) las partes gh y ha' son rectas. En ambos casos los bordes exteriores de las paletas deben biselarse con el objeto de que presenten poca resistencia a la entrada del agua.

Las figuras 24 y 25 muestran una rueda en madera y otra en hierro y posibles alternativas de tomas de energía por piñones.

1.3.6.4 Trazado de paletas de ruedas con agua por el lado: Sea AB Figura 26, la parábola que representa el eje de la vena de agua al entrar en la rueda, como se explicó en las ruedas de aguas arriba.

- Con radio  $R = 0.5 d$ , se traza el arco  $m.n$ , que debe ser casi tangente a  $AB$ .
- Se trazan los arcos  $ac$  y  $eb$  que corresponden a los bordes interior y exterior de la corona.
- Partiendo de  $A$ , trácese el radio  $Af$ , y desde el punto de intersección  $g$  de esta línea con el borde interior  $be$  de la corona, se traza una recta  $gk$ , tangente a  $be$ .
- Por el punto  $i$ , en que  $AB$  corta a  $mm$ . se traza el radio  $OP$  y la recta  $ij$ , ésta formando un ángulo de  $30^\circ$  con  $OP$ .
- Se unen  $ij$  y  $GK$  por medio de un arco cuyo radio sea  $d/2$ .
- La figura 26, b. muestra la forma similar como se construye en madera.

#### 1.3.6.4.1 Dimensiones ruedas con agua por el lado.

- La velocidad periférica de la rueda es normalmente 1 a 2 mts/seg.
- La velocidad del agua más conveniente está entre 1.5 a 2 veces la velocidad periférica de la rueda.
- La profundidad de los cangilones está entre 25 y 40 cm.
- El diámetro de la rueda se hace aproximadamente igual al doble de la caída total del agua.
- El paso de los cangilones puede ser  $\leq$  que la profundidad de los mismos.
- El ancho de la rueda se calcula entre  $\frac{1.5 Q}{d.v.}$  y  $\frac{2Q}{dv}$ , siendo:

$Q =$   $mt^3$ /seg. del agua.

$d =$  profundidad de los cangilones en mts.

$v =$  velocidad de entrada del agua a los cangilones en mts/seg.

#### 1.3.6.4.2 Dimensiones ruedas con agua por arriba.

- La velocidad periférica de la rueda varía según el diámetro de la rueda, así: 0.75 mts/seg. para diámetros menores de 5 metros. 3 mts/seg. para diámetros mayores de 5 metros.
- La altura del agua para estas ruedas puede fluctuar entre 2.4 y 22,5 metros.
- El caudal del agua aceptable varía entre 100 y 1.000 litros/seg.
- La altura del agua óptima está entre 3 y 6 metros.
- La velocidad de entrada del agua está entre 1.5 y 2 veces la velocidad periférica de la rueda.
- La carga que produce la velocidad de salida del agua debe ser un 10% superior a

la carga teórica para compensar las pérdidas por fricción en la compuerta de salida.

- El número de cangilones puede variar entre  $8D$  y  $10D$  siendo  $D$  el diámetro de la rueda en metros.
- La profundidad de los cangilones varía entre 25 y 35 cms.
- El ancho de los cangilones varía entre 3 y 4  $\left(\frac{Q}{d \cdot v_1}\right)$  siendo:

$Q$  = caudal del agua en  $\text{m}^3/\text{seg}$ .

$d$  = la profundidad de los cangilones en metros.

$v_1$  = velocidad periférica de la rueda (metros/seg).

## FIGURAS

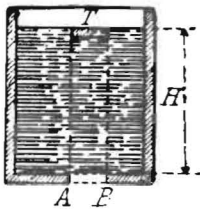


FIGURA 1

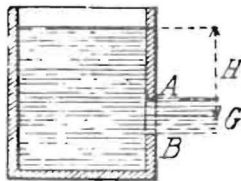


FIGURA 2

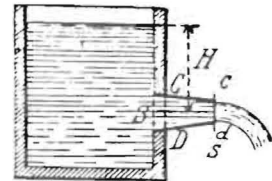


FIGURA 3

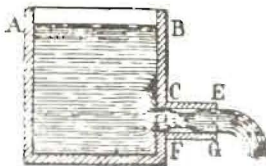


FIGURA 4

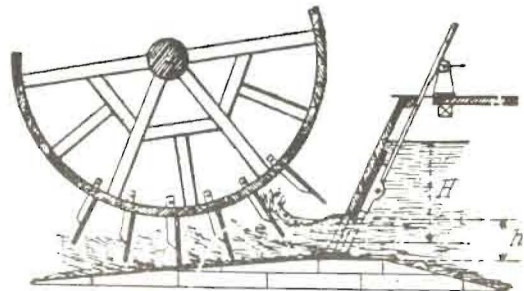


FIGURA 5

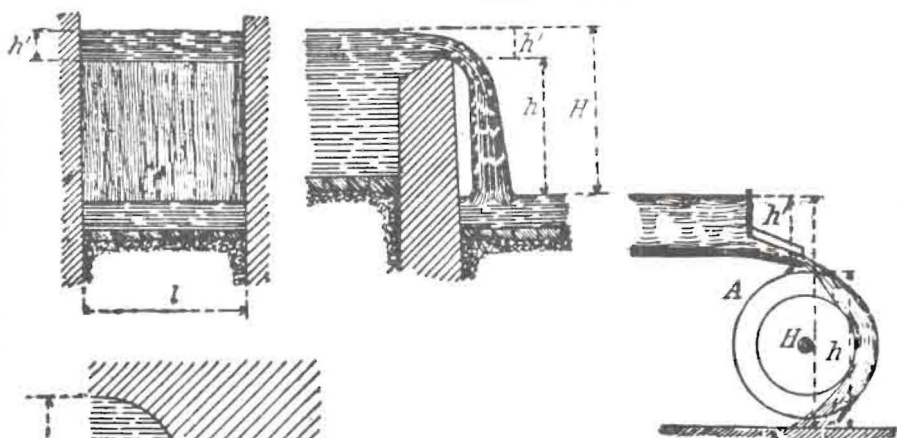


FIGURA 7

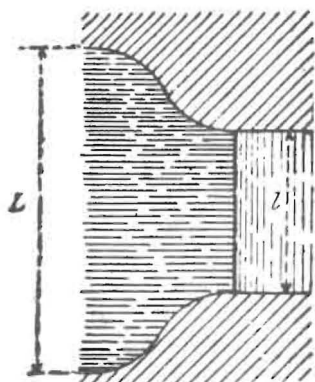


FIGURA 6

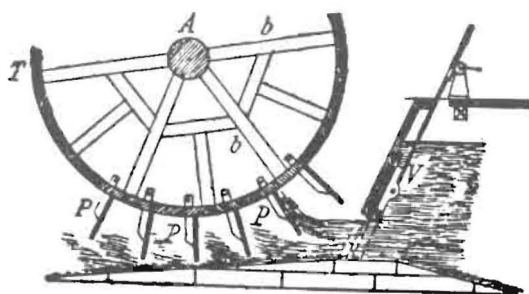


FIGURA 8

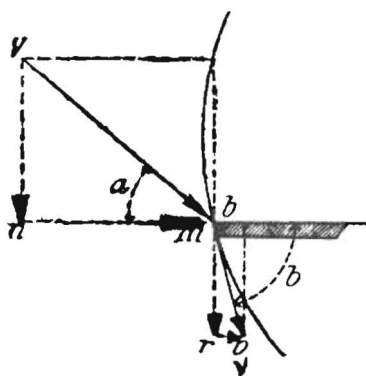


FIGURA 9

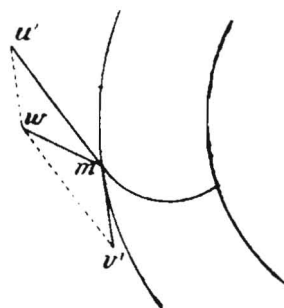


FIGURA 10

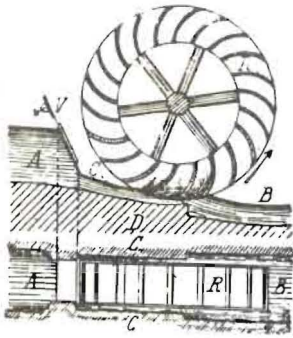


FIGURA 11

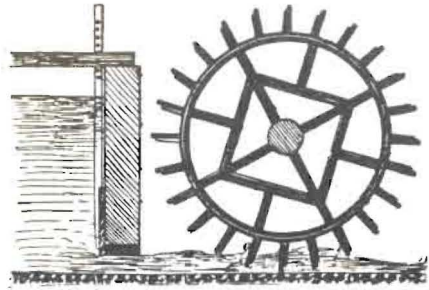


FIGURA 12

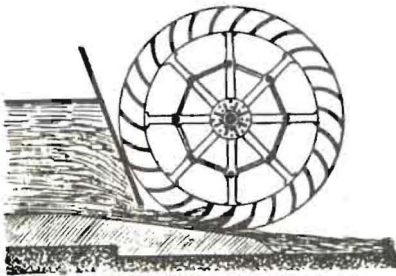


FIGURA 13

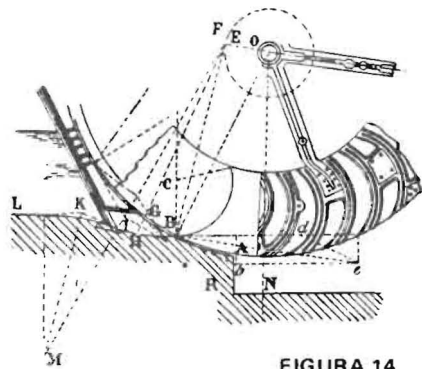


FIGURA 14

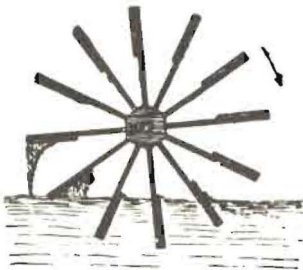


FIGURA 15

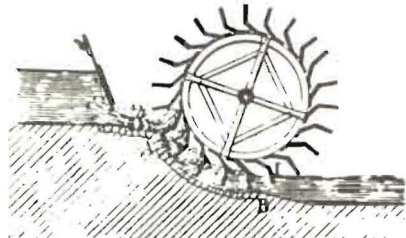


FIGURA 16

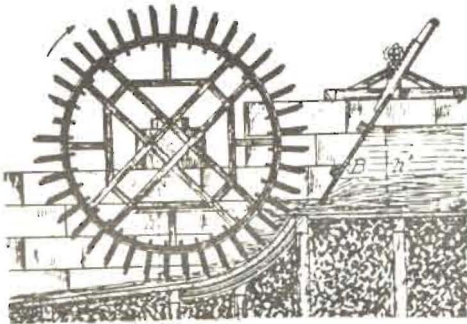


FIGURA 17

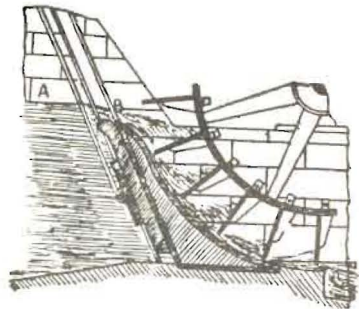


FIGURA 18

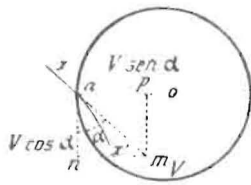


FIGURA 19

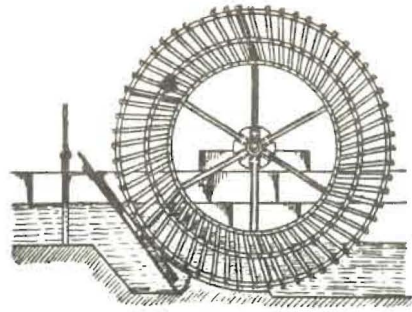


FIGURA 20

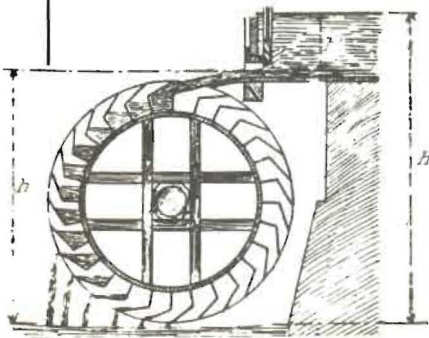


FIGURA 21

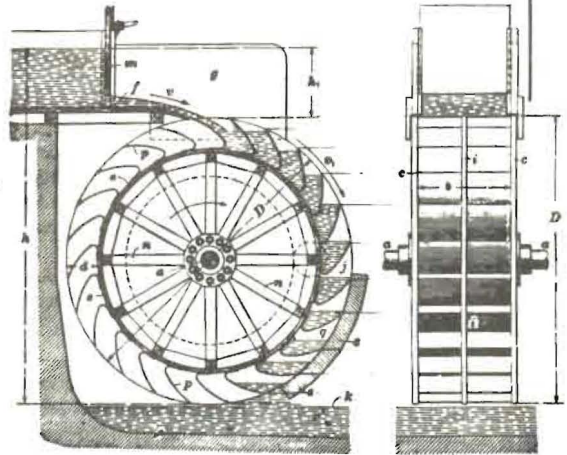


FIGURA 22

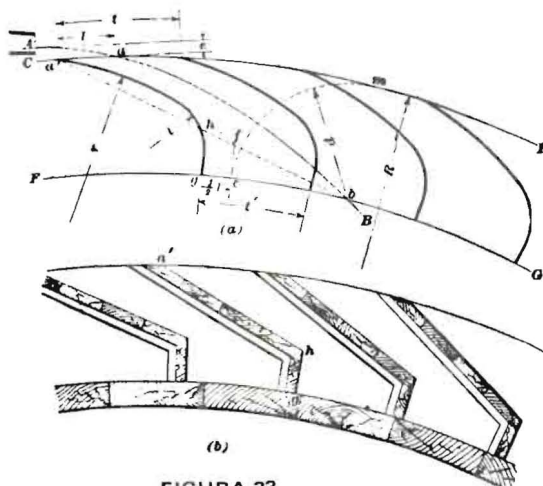


FIGURA 23



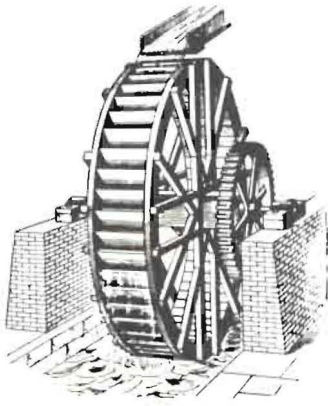


FIGURA 24

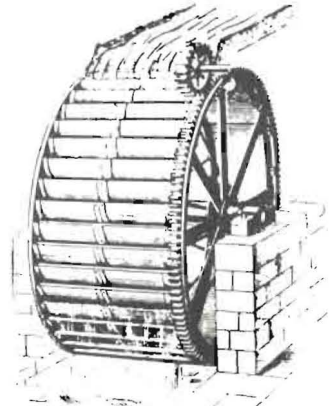


FIGURA 25

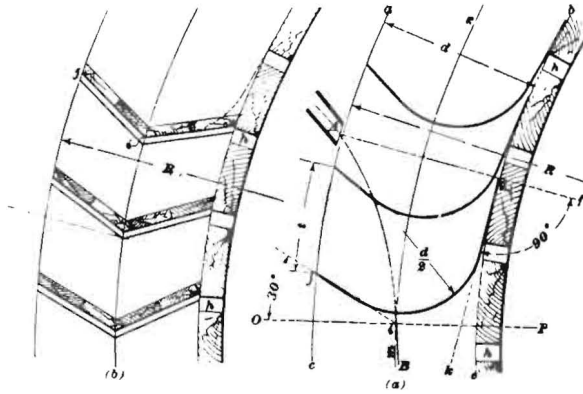


FIGURA 26

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BIBLIOTECA DE LAS ESCUELAS INTERNACIONALES. Máquinas Hidráulicas. Obras de enseñanza y consulta. International Educational Publishing Company. Scranton, P.A. E.E.U.U. 23 p.

BOCQUET, J.A. Course Elementaire de Mecanique Appliquée. 1909. 180 p.

MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Harper y Row Publishers Inc. Ed. Harla, S.A. México. 1972. 582 p.

MOULAN, P.H. y C. GERDAY. Tratado de Mecánica Industrial. 3a. ed. Editorial Gustavo Gili, Barcelona. 1924. 1097 p.

NACENTC. Mecánica Práctica y Aplicada.

..... . Traité de Génie Rural. Documento.