

El molinete, importancia, fundamentos y buenas prácticas. Primera edición digital

Edmundo Pedroza González



Autor

Edmundo Pedroza González

El molinete, importancia,
fundamentos y buenas
prácticas

Primera edición digital

IMTA

México, 2017

551.483 Pedroza González, Edmundo
P54 *El molinete, importancia, fundamentos y buenas prácticas* / Edmundo Pedroza
González -- Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2017.
108 p.

ISBN 978-607-9368-87-6 (obra digital)

I. Molinetes hidráulicos 2. Mediciones hidráulicas

El molinete, importancia, fundamentos y buenas prácticas

Autor:

Edmundo Pedroza González

Editora:

Gema Alín Martínez Ocampo

Coordinación editorial

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Colección: "Divulgación"

Diseño editorial, formación y diseño de portada

Gema Alín Martínez Ocampo

Primera edición digital: Diciembre, 2017

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532

62550 Progreso, Jiutepec, Morelos

México

www.imta.gob.mx

ISBN: 978-607-9368-87-6 (obra digital)

Prohibida su reproducción parcial o total, por cualquier medio, mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los editores.

Impreso en México – Printed in Mexico

Índice

I. Antecedentes	I
1.1. La importancia del aforo en ríos	1
1.2. ¿Qué es un molinete y cómo funciona?	2
1.3. ¿Por qué se le llama “molinete”?	2
1.4. ¿Cómo se dice: gasto o caudal?	4
1.5. ¿Qué es el gasto?	5
2. Historia del molinete	7
2.1. Los primeros intentos para aforar	11
2.2. Flotadores libres	12
2.3. Flotadores fijos	14
2.4. Paletas	18
2.5. Medidores de rueda de paletas	20
2.6. El tubo de Henri Pitot	23
2.7. Rotores	24
2.8. Molinetes de eje horizontal	27
2.9. Molinetes de eje vertical	32
3. Descripción del molinete actual	37
3.1. Componentes de un molinete: enfoque convencional	37
3.2. Componentes de un molinete: enfoque como conjunto de medición	40
4. La calibración de los molinetes	55
4.1. Porqué se debe calibrar un molinete	55
4.2. El laboratorio de calibración de molinetes	56
4.3. Descomposturas más comunes en molinetes	57
4.4. El tanque de calibración del IMTA	57
4.5. El sistema de Calibración de Medidores de Flujo (SCM)	58
4.6. Caracterización como sinónimo de calibración	62
5. Importancia de la velocidad media en aforo con molinete	63
5.1. El concepto de velocidad media	65
5.2. El método de área velocidad y el molinete	65
6. Buenas prácticas en el aforo con molinete	83
6.1. Algunos conceptos de metrología aplicados al aforo con molinete	83
6.2. Arrastre del molinete	90
6.3. Número de dovelas en la sección	91
6.4. Número ideal de repeticiones en los aforos	92
Referencias	95

Figuras

Figura 1.1	“Moulinet” de Dubuat en 1780.	3
Figura 1.2	Diferentes formas de una conducción	6
Figura 2.1	Leonardo Da Vinci	7
Figura 2.2	Experimento de Leonardo y figura explicativa del movimiento	8
Figura 2.3	Técnica de adelgazamiento del hilo de oro o plata por parte de los orfebres	9
Figura 2.4	Portada del libro de Arthur H. Frazier	11
Figura 2.5	Primer aforador registrado de la historia	12
Figura 2.6	Flotador de Da Vinci para medir la velocidad	13
Figura 2.7	Leonardo Da Vinci midiendo las velocidades	13
Figura 2.8	Diferentes flotadores usados en el siglo XVII	14
Figura 2.9	Medidor de velocidad de barcos de Camillo Agrippa	15
Figura 2.10	Cuadrante y bola de Guglielmini	15
Figura 2.11	Distribución errónea de las velocidades en una corriente según Gugliemmini (a) y distribución correcta (b)	16
Figura 2.12	Diferentes modelos de medidores basados en contrapesos	17
Figura 2.13	Balanzas de Santorio para medir el impacto del viento y de la corriente de agua	18
Figura 2.14	Medidores de paleta de Gauthey, 1779.	19
Figura 2.15	Tres medidores de Leonardo Ximenes, 1780.	19
Figura 2.16	Medidor de corriente de Christiaan Bruning (1788)	20
Figura 2.17	Ruedas de paletas para calcular la velocidad y distancia recorrida por las embarcaciones	21
Figura 2.18	Rueda de paletas de Marsili	21
Figura 2.19	Rueda de paletas de Francesco Domenico Michelotti (1760)	22
Figura 2.20	Rueda de paletas de Dubuat (1780)	22
Figura 2.21	Rueda mecanizada de Brewster, 1868	22
Figura 2.22	Medidor de Henri Pitot, 1732	23
Figura 2.23	Funcionamiento del tubo de Pitot	23
Figura 2.24	Modificaciones de Dubuat al tubo de Pitot	24
Figura 2.25	Propuestas de Henry De Soumarez, 1715.	25
Figura 2.26	Réplica del rotor de paletas de Henry Soumarez, 1715.	26
Figura 2.27	Réplica del rotor de varilla en “Ye” de De Soumarez, 1716.	26
Figura 2.28	Posible apariencia del rotor de Robert Hooke, 1683	27
Figura 2.29	Replica del molinete de Woltman, 1790.	28
Figura 2.30	Molinete de Révy, 1874.	28
Figura 2.31	Molinete de Saxton. 1836.	29
Figura 2.32	Molinete Abbot, 1877	29
Figura 2.33	Molinete de Baumgarten, 1846.	29

Figura 2.34	Molinete del ingeniero Hall, 1880	30
Figura 2.35	Molinete Ritchie-Haskell, 1885.	31
Figura 2.36	Molinete de Departamento de Irrigación, 1889.	31
Figura 2.37	Molinete Moore, 1875.	31
Figura 2.38	Rotor Kolupaila, aproximadamente 1944.	32
Figura 2.39	Medidor Toloti, 1823.	32
Figura 2.40	Molinete de eje vertical, copas y registro eléctrico de Daniel Farrand Henry, 1868.	33
Figura 2.41	Molinete Ellis, 1874.	33
Figura 2.42	Molinetes Nettleton (a), 1883, y "Bailey" (b), 1889.	34
Figura 2.43	Molinete Price "acústico", 1895.	35
Figura 2.44	Molinete pequeño de Edwin Geary Paul, 1892; e instalaciones de calibración.	35
Figura 2.45	Primer molinete comercial Price "penta", 1912.	36
Figura 3.1	Partes de un molinete (35 componentes)	38
Figura 3.2	Partes de un molinete (30 componentes)	39
Figura 3.3	Componentes de un molinete: enfoque como conjunto de medición	41
Figura 3.4	Rueda de copas	42
Figura 3.5	Forma de la placa donde se montan las copas	42
Figura 3.6	Pivote con su tuerca	43
Figura 3.7	Tornillo sin fin de una pieza	43
Figura 3.8	Tuerca "moleteada" y repuestos de joyas	44
Figura 3.9	Tornillo sin fin de dos piezas	45
Figura 3.10	Extracción y rectificación de la joya	45
Figura 3.11	Unión del tornillo sin fin con la rueda de copas	45
Figura 3.12	Tope en el ensanchamiento del tornillo sin fin	45
Figura 3.13	Cámara de contactos con los aislantes de las espirales	46
Figura 3.14	Vista del interior de la cámara de contactos	47
Figura 3.15	Molinete con cámara de contactos de funcionamiento magnético	48
Figura 3.16	Espirales "uno a uno" y "penta" con los aislantes de contacto y tuercas "moleteadas"	48
Figura 3.17	Engrane de 16 dientes (a) y engrane de 11 dientes (b)	49
Figura 3.18	Pestañas de doble y triple contacto	49
Figura 3.19	Corte transversal del acoplamiento de los subconjuntos de giro y transmisión	50
Figura 3.20	Esquema ilustrativo del subconjunto de conteo	51
Figura 3.21	Rueda de copas con una de ellas pintada para conteo visual directo	51
Figura 3.22	Conjunto de sujeción, opción rígida	52
Figura 3.23	Timón y cruceta	52
Figura 3.24	Dos tipos de horquilla	53
Figura 3.25	Solera unida a la horquilla	53
Figura 3.26	Dos tamaños de escandallo	54
Figura 3.27	Subconjuntos de un molinete	54

Figura 4.1	Molinetes recién lavados.	56
Figura 4.2	Revisión del giro de la rueda de copas en un molinete “pigmeo”.	56
Figura 4.3	Canal de trayectoria circular del IMTA	57
Figura 4.4	Primer hoja del reporte de calibración.	59
Figura 4.5	Segunda hoja del reporte de calibración.	60
Figura 4.6	Tercer hoja del reporte de calibración.	61
Figura 5.1	Distribución de velocidades en un canal recto	63
Figura 5.2	Distribución de velocidades, en m/s, en el conducto Subury.	64
Figura 5.3	Distribución de las velocidades de un canal abierto.	64
Figura 5.4	Perfil en planta de las velocidades en el canal “Las Estacas” en el estado de Morelos, medidas con un perfilador doppler montado en un flotador.	65
Figura 5.5	Concepto de “Velocidad media”.	65
Figura 5.6	Justificación del uso de dovelas en la medición con molinete.	66
Figura 5.7	Seccionamiento para el aforo con procedimiento de 2 puntos, en secciones transversales intermedias, seis décimos en las laterales y subsuperficial en las extremas	67
Figura 5.8	Libreta de aforo, llenado de la columna 1.	68
Figura 5.9	Libreta de aforo, llenado de la columna 2.	69
Figura 5.10	Libreta de aforo, llenado de la columna 3.	70
Figura 5.11	Libreta de aforo, llenado de la columna 4.	71
Figura 5.12	Libreta de aforo, llenado de la columna 5.	72
Figura 5.13	Libreta de aforo, llenado de la columna 6.	73
Figura 5.14	Libreta de aforo, llenado de la columna 7.	74
Figura 5.15	Libreta de aforo, llenado de la columna 8.	75
Figura 5.16	Libreta de aforo, llenado de la columna 9.	76
Figura 5.17	Libreta de aforo, llenado de la columna 10.	77
Figura 5.18	Libreta de aforo, llenado de la columna 11.	78
Figura 5.19	Libreta de aforo, llenado de la columna 12.	79
Figura 5.20	Libreta de aforo, llenado de la columna 13.	80
Figura 5.21	Libreta de aforo, llenado de la columna 14.	81
Figura 5.22	Libreta de aforo, valores totales del área, gasto y velocidad media.	82
Figura 6.1	Diferentes tipos de errores en los aforos	85
Figura 6.2	Error sistemático en el aforo de las extracciones de una presa	88
Figura 6.3	Incertidumbre: medida de la dispersión de datos	89
Figura 6.4	Corrección por arrastre del molinete debido a la fuerza de la corriente	90
Figura 6.5	“Retenida” para evitar el arrastre del molinete	91
Figura 6.6	Incertidumbre típica de aforo con molinete, de acuerdo al número de dovelas	92

Cuadros

Cuadro 1.1	Designación oficial del gasto	5
Cuadro 1.2	Explicación y desarrollo de la ecuación de gasto o caudal	6
Cuadro 5.1	Ancho de las franjas en función del ancho de la corriente	67
Cuadro 6.1	Corrección por desviación de la vertical	91
Cuadro 6.2	Ancho de las franjas en función del ancho de la corriente, según Kennedy et al (1992)	92
Cuadro 6.3	Ancho de las franjas en función del ancho de la corriente, según la Comisión Nacional del Agua (1993)	92
Cuadro 6.4	Incertidumbre típica de aforos, en función de la profundidad del molinete y del tiempo de conteo	93
Cuadro 6.5	Diferencia de gastos entre aforos simultáneos con molinete y aforos en presas hidroeléctricas	94



1 ANTECEDENTES

1.1. LA IMPORTANCIA DEL AFORO EN RÍOS

El aforo en ríos, debe entenderse como el conjunto de acciones realizadas para conocer la cantidad de agua que escurre en una corriente, particularmente en este caso, la corriente de agua en los ríos. Dicho lo anterior, se establece que la Comisión Nacional del Agua es la institución federal que tiene como misión “preservar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para su administración sustentable y garantizar la seguridad hídrica con la responsabilidad de los órdenes de gobierno y la sociedad en general” (www.gob.mx/conagua). Para ello se divide en varias Subdirecciones y en un gran número de gerencias. Para este caso, la gerencia más importante es la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR); es una dependencia de la Subdirección General Técnica y bajo su encargo se realizan muchos de los aforos de ríos en México.

La importancia del aforo en ríos para la GASIR es muy alta, dado que la información que se obtiene es fundamental para el manejo seguro y eficien-

te del agua. Entre otras, las siguientes son los beneficios del aforo: (a) pronóstico hidrológico; (b) manejo de vertedores ante avenidas; (c) determinación de la disponibilidad de aguas superficiales.

En cuanto al pronóstico hidrológico Pérez y Rubio (2012) indican que: “El pronóstico de caudales es usado para alertar a la población en áreas amenazadas por las probables inundaciones, además de alertar al personal encargado de la operación de estructuras de control de avenidas, como es la operación de vertedores controlados por compuertas en presas. El pronóstico hidrológico también es utilizado en la operación de sistemas de irrigación, sistemas de abastecimiento de agua potable, plantas hidroeléctricas, etc.”. Los modelos de pronóstico requieren de datos de aforo y nivel del agua en ríos. Es aquí donde se muestra la utilidad de los gastos y caudales.

Por otro lado Pérez et al (2017) mencionan que se pueden elaborar planes de maniobras en las compuertas de los vertedores de acuerdo a análisis previos que requieren de información de los escurrimientos de agua que ingresan a las presas.

Ello significa que se deben tener aforos aguas arriba de la presa para realizar cálculos de manera que se puedan mover las compuertas de los vertedores y así evitar que los niveles de agua lleguen a alturas peligrosas, en este caso que se rebasen los niveles de aguas máximos extraordinarios (NAME).

Según Bautista et al (2012), es importante conocer la disponibilidad de agua en regiones diversas que pueden ir desde la disponibilidad media total de un país hasta la disponibilidad de una subregión como una o varias cuencas hidrológicas. La importancia de su conocimiento redunda en "llevar a cabo acciones para una mejor administración del agua superficial".

1.2. ¿QUÉ ES UN MOLINETE Y CÓMO FUNCIONA?

Para explicar qué es un molinete y cómo funciona, es conveniente informar que para conocer la cantidad de agua que escurre en un río, se utiliza una fórmula en la que interviene la velocidad de agua y para conocerla se puede utilizar precisamente un molinete. Dicho dispositivo es, en realidad, un conjunto de elementos cuyo componente sustantivo es un rotor acompañado de una serie de accesorios que hacen posible su funcionamiento.

El funcionamiento del molinete inicia con la inmersión del conjunto en la corriente de agua, una vez ubicado a una cierta profundidad, el rotor comienza a girar debido al empuje de la corriente. El nú-

mero de giros resulta, naturalmente, proporcional a la velocidad del agua. Los accesorios hacen posible la colocación del rotor a la profundidad deseada, su alineación con la corriente y la posibilidad de contar los giros. La manera más común de contar los giros es por medio de un circuito eléctrico.

En el capítulo 3, se presenta con todo detalle la descripción de cada uno de los componentes del conjunto.

1.3. ¿POR QUÉ SE LE LLAMA "MOLINETE"?

Si se consulta el diccionario de la Real Academia Española (www.rae.es) se encontrará que la palabra "molinete" viene del diminutivo de la palabra "molino" y tiene seis acepciones: (1) sinónimo de ventilador; (2) rehilete; (3) figura de baile; (4) en esgrima movimiento circular de defensa; (5) una especie de torno en un barco y (6) una suerte de la lidia en la tauromaquia. Entonces: ¿por qué se usa la palabra *molinete* para designar a un aparato de medición de velocidad del agua?

A modo de aclaración es pertinente apuntar que cuando se designa el diminutivo de un adjetivo se utiliza un "sufijo" y en este caso el sufijo es *-ete*. Así la palabra *molino* se transforma en *molinete*. Sin embargo, ello aún no es de mucha utilidad.

Poniendo atención al sufijo *-ete* e investigando (www.rae.es) se encuentra que *-ete* "es un

sufijo usado para formar diminutivos despectivos u otras palabras de valor afectivo, a veces de manera no muy explícita, a partir de adjetivos y sustantivos. *Regordete, calvete, vejete, amiguete, caballere*te. Muchas palabras han perdido esos valores. *Peseta, juguete*. No pocos sustantivos vienen directamente del francés. *Bonete, florete, ribete*. En ciertos casos, toma la forma *-ete*. *Meloncete*".

Lo anterior indica que se usó el sufijo *-ete* y ello tiene connotación despectiva; pero no resulta lógico ya que en español se usa el sufijo *-ito* cuando no se tienen intenciones despectivas. Así la palabra *molino* se convierte en *molinito* cuando lo que se quiere decir es "molino chiquito". Pero la atención

está sobre la palabra *molinete* y no se tiene interés en la palabra *molinito*.

Llama la atención que algunas palabras del español vienen directamente del francés, tal vez este sea uno de esos casos ya que el sufijo *-et*, en francés no tiene connotación despectiva. Así, se puede aceptar que la palabra *molinete* viene del francés *moulinet*, sin embargo subsiste la pregunta: ¿por qué?

Según Frazier (1974) el investigador hidráulico francés Pierre Louis Georges Dubuat construyó su "moulinet" en 1780 (Figura 1.1). Al parecer, Dubuat fue el primero en llamarlo así, por el gran parecido con una rueda de molino hidráulico. Todo esto se verá con detalle en el capítulo de historia del molinete.

Figura 1.1 "Moulinet" de Dubuat en 1780.



(Fuente: Frazier ,1974)

En conclusión: el molinete tiene este nombre porque es el diminutivo de “molino” en francés; y probablemente este nombre se lo puso Dubuat en 1780 debido a que su dispositivo se asemejaba a un molino hidráulico.

Se pueden suponer un poco más y decir que el primer aparato llegó a México proveniente de España, puesto que si hubiese llegado de Estados Unidos sería *current meter*. También se puede suponer que los españoles tomaron el nombre del francés, pero por escrito, dado que la pronunciación de la palabra francesa *moulinet* sería algo así como “moliné”, sin la terminación “te”.

1.4. ¿CÓMO SE DICE: GASTO O CAUDAL?

En el ámbito de los aforos en ríos es más usada la palabra “gasto” que la palabra “caudal” aunque ambas se refieren a la cantidad de agua que escurre o pasa por un sitio determinado en un cierto tiempo. En lo que sigue se indicará sobre el significado de ambas palabras y la idoneidad para su uso.

El diccionario de la Real Academia Española tiene una acepción física (la tercera) para la palabra *gasto*: “Cantidad de fluido que, en determinadas circunstancias, pasa por un orificio o por una tubería cada unidad de tiempo”. Por otro lado, la palabra *caudal* tiene una acepción muy parecida

(la sexta): “cantidad de un fluido que discurre en un determinado lugar por unidad de tiempo”. De esta manera, la palabra más adecuada para el escurrimiento en ríos es caudal; dado que, según el diccionario, la palabra *gasto*, es para un orificio o una tubería. Sin embargo, ambos tienen un inconveniente: ninguno se refiere específicamente al agua, ambos se refieren un fluido, que puede ser cualquier líquido o cualquier gas.

De manera legal u obligatoria se debe obedecer la Ley sobre Metrología y Normalización. En ella se estipula en el artículo 7º, capítulo I, título segundo, que “las unidades base, suplementarias y derivadas del Sistema General de Unidades de Medida así como su simbología se consignarán en las normas oficiales mexicanas”. La norma oficial que corresponde es la Norma Oficial Mexicana “NOM-008-SCFI-1992 Sistema General de Unidades de Medida”.

En dicha norma, en la tabla 8 de magnitudes y unidades de mecánica, se puede observar que se debe usar la frase gasto o flujo volumétrico (Cuadro 1.1); sin embargo, en el ámbito del aforo en ríos, lo usual es, y seguirá siendo, la palabra “gasto”.

Un apunte más al respecto se refiere a la explicación del uso de la letra *Q*. Ello se deriva, aparentemente, de la palabra “cantidad” en inglés (*quantity*) y según la ley se debiera utilizar la letra “q” en minúscula seguida por la letra “v” como subíndice; hecho que tampoco se considera usual.

Cuadro 1.1 Designación oficial del gasto

Magnitud: Gasto volumétrico, flujo volumétrico

Símbolo de la magnitud: q_v

Definición de la magnitud: Volumen de materia el cual atraviesa una superficie determinada por el tiempo

Unidad del Sistema Internacional: Metro cúbico por segundo

Símbolo de la unidad del Sistema Internacional: m^3/s

1.5. ¿QUÉ ES EL GASTO?

La definición de gasto es muy intuitiva; a saber: “cantidad de agua que pasa por una sección en una determinada cantidad de tiempo”. Se puede utilizar la analogía de una carretera o una calle por la que circulan carros; simplemente el gasto sería el número de carros que pasan por un sitio cualquiera (por ejemplo un tope) en un periodo determinado. De esta manera se podría decir que pasan, por ejemplo, cinco carros por minuto.

Otro ejemplo: una fila de camionetas que llevan un tanque de un metro cúbico pasan frente a una persona y ésta contabiliza el número de camionetas que pasan. Si pasan treinta camionetas en 30 segundos, entonces se tendrá un gasto de 30 metros cúbicos en 30 segundos. Se acostumbra utilizar la letra Q para evitar escribir la palabra “gasto”. De esta manera, se puede escribir: Gasto= $Q=30$ metros cúbicos por cada 30 segundos. Entra aquí el concepto de división ¿cuántos metros cúbicos le corresponden a cada segundo? Se divide el número de metros cúbicos entre el número de segundos.

$$Q = 30 \text{ metros cúbicos} / 30 \text{ segundos}$$

$$Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$$

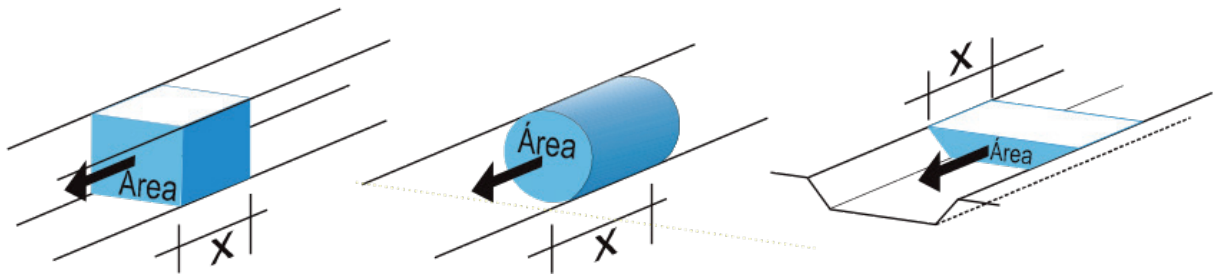
La manera de calcular el gasto es simple: se divide el volumen de agua que escurre entre un periodo de tiempo.

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}} \quad (1.1)$$

Sin embargo, para calcular el gasto en corrientes a superficie libre o presurizadas, se multiplica la velocidad media del agua por el área ($Q=AV$). A esta fórmula se le llama *Ecuación de Castelli*, dado que a él se atribuye su planteamiento original. En seguida se muestra cómo se pasa de una formulación a otra.

Se puede imaginar que en un escurrimiento dentro de una conducción, el agua avanza en bloques a una cierta velocidad (Figura 1.1); y aún más, se puede imaginar que dicha conducción es cuadrada o circular (Figura 1.1b) o incluso se tiene escurrimiento en un canal de forma trapecial (Figura 1.1c). La explicación y desarrollo se presentan en la Cuadro 1.2.

Figura 1.2 Diferentes formas de una conducción



Cuadro 1.2 Explicación y desarrollo de la ecuación de gasto o caudal

Conceptualización	Álgebra	
El gasto (Q) es el volumen (Vol) sobre el tiempo (t)	$Q = \frac{Vol}{t}$	(a)
El volumen se puede calcular como el área por una profundidad. Como puede apreciarse en la Figura 1.2, los tres volúmenes se pueden definir como el área, identificada por la letra A , y la profundidad por una X .	$Vol = AX$	(b)
Sustituyendo (b) en (a)	$Q = \frac{AX}{t}$	(c)
Siendo x , una distancia y al quedar dividida entre el tiempo, naturalmente surge el concepto de velocidad (V)	$V = \frac{X}{t}$	(d)
Sustituyendo (d) en (c) se obtiene la ecuación de para calcular el gasto.	$Q = AV$	(1.2)

De aquí que el gasto se pueda calcular multiplicando el área por la velocidad, en este caso se llama área hidráulica y es el área identificada con la letra

a en la Figura 1.2; y esto hace mucho más sencillo estimar la cantidad de agua escurriendo por una conducción, no importa si es muy grande.

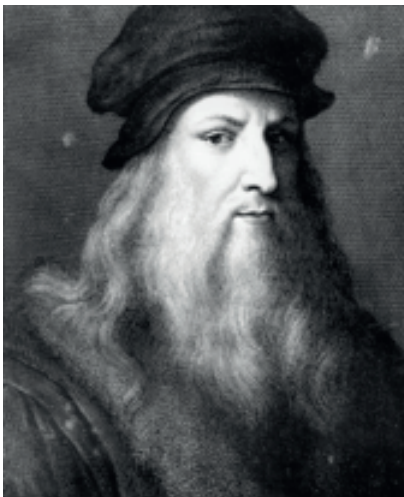
2

HISTORIA DEL MOLINETE

Antes de comenzar la historia relacionada directamente con el molinete, es importante presentar la historia de la ecuación con la que se calcula el gasto. Lo siguiente se encuentra en Levi (1985):

En Roma, ciudad de las fuentes, se acostumbraba medir las aguas con orificios cuadrados, circulares y rectangulares, con dimensiones basadas en “onzas”, que son un doceavo de pie. De esta manera,

Figura 2.1 Leonardo Da Vinci



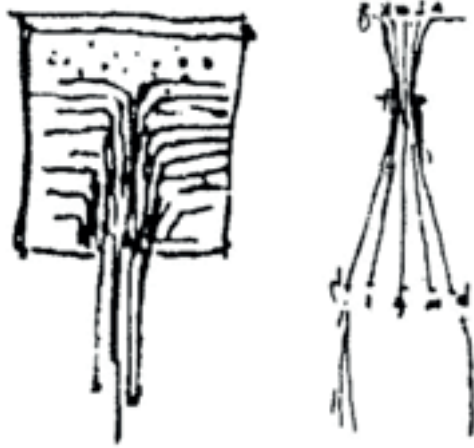
(Fuente: discovermagazine.com)

una “onza” de agua era la cantidad de agua que debiera escurrir por un orificio circular de una onza de diámetro o por un orificio cuadrado de una onza de lado, o bien, el escurrimiento por un orificio rectangular de una onza de base y una onza de altura de agua.

Leonardo Da Vinci, enfrentando como ingeniero ducal el problema de repartir correctamente el agua de riego, entiende lo inadecuado de medir el agua por onzas sin tomar en cuenta la profundidad del agua antes de la descarga.

Para determinar cuáles son los factores que afectan la descarga de un orificio, Leonardo propone (no se sabe si en realidad lo hizo) construir un recipiente con cristales y cera, llenarlo de agua y colocarle unas semillas que floten en toda la profundidad; después se debe hacer un pequeño agujero en el fondo y dar salida al agua “el movimiento de dichas simientes te informará cuál agua corre con más velocidad a la salida y de qué sitio se mueve”- afirmaba Leonardo-.

Figura 2.2 Experimento de Leonardo y figura explicativa del movimiento



(Fuente: Levi, 1985)

El examen del flujo a través del orificio llevó naturalmente a Leonardo a convencerse de que “las medidas en onzas para bocas de agua son mayores o menores según si es mayor o menor la velocidad del agua que pasa por la boca: doble velocidad en un mismo tiempo dará doble cantidad de agua y así sucesivamente”. Afirmación correcta que relaciona la velocidad en un escurrimiento con el gasto en el mismo. Leonardo también expresa muy claramente el principio de continuidad: “en los ríos, cualquiera que sea su ancho y profundidad, sucede por necesidad que, en todo grado de su longitud, en igual tiempo, pasa igual cantidad de agua”.

En el año de 1598 Roma sufrió una grave inundación provocada por el desbordamiento del río Tíber, de hecho la peor de que se tiene memoria. El arquitecto Giovanni Fontana (1546-1614) intentó medir el escurrimiento total observando las hue-

llas dejadas por la avenida, pero no podía hacerlo en el mismo cauce porque había sido insuficiente. Decidió entonces calcular el gasto sumando los aportes en el tramo superior y en todos los afluentes. Midió las áreas de las secciones mojadas de esos ríos y riachuelos, localizando en cada cauce las huellas de aguas máximas en hierbas dobladas, sedimento depositado o erosiones. El resultado fue que escurrieron 500 *cañas*. La “caña” era una medida longitudinal de un poco más de 2 metros, por lo que parece más adecuado decir que escurrieron 500 *cañas* cuadradas; el río tenía una capacidad de aproximadamente un tercio de esa cantidad, por lo que Fontana infirió que debían construirse dos cauces más de similar tamaño. Sin embargo, toda el agua escurrió por debajo del puente “Quatro Cappi”, también llamado Fabricio, de unas 150 *cañas* de sección... Fontana concluyó que el agua se había comprimido.

Aquí es pertinente un paréntesis anecdótico. Levi indica, citando a Fontana, que toda el agua escurrió por debajo del puente Quatro Cappi; sin embargo, el río Tíber escurre por una isla en esta parte, precisamente la Isla Tiberina, ello significa que la avenida escurrió por dos puentes; en efecto, el otro puente es el Cestio. El puente Quatro Cappi tiene una sección de 150 *cañas*, se puede suponer que el puente Cestio tiene la misma sección; esto da un total de 300 *cañas*, que aún es una sección insuficiente para que pasaran las 500 *cañas* en exceso, pero de cualquier manera es una capacidad mayor a la de 150 *cañas* de un solo puente. Se sigue con lo indicado por Levi.

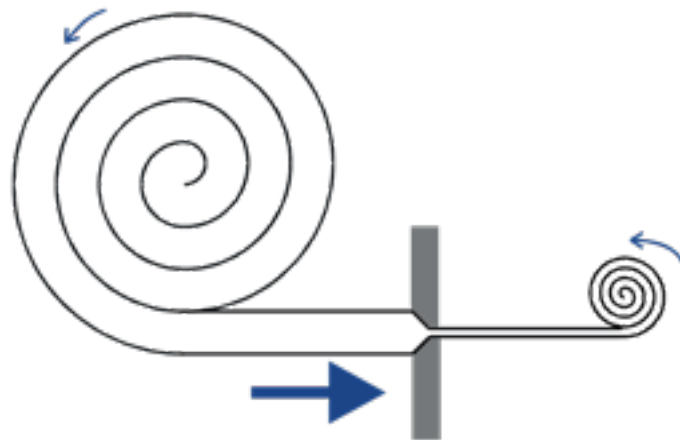
La conclusión de Fontana no convence al padre Benedetto Castelli (1578-1643) “no entiendo que el agua sea como el algodón o la lana, materiales que puedan comprimirse y apretarse, como también ocurre con el aire”. Entre otras consideraciones dice: “habiendo cabido toda la avenida debajo del puente sería suficiente un solo cauce con la misma capacidad de dicho puente, siempre que el agua escurriera con la misma velocidad que alcanzó debajo de él, en ocasión de la inundación.” El gasto de un río no puede depender del área hidráulica solamente, se debe también considerar la velocidad. Este era un asunto que intrigó a Castelli durante un tiempo. Cabe aquí preguntar: ¿Castelli no sabía de los trabajos de Leonardo Da Vinci al respecto?

La solución surgió de un fenómeno sin relación aparente con la hidráulica. Castelli observó el trabajo de los joyeros, quienes con asombroso ingenio adelgazaban el hilo de oro y plata. El proceso era el siguiente: primeramente colocaban hilo grueso en

un carrete, después lo hacían pasar por un orificio de menor diámetro en una placa metálica y finalmente lo enrollaban en un segundo carrete, que al jalar el hilo lo adelgazaba, al forzarlo a pasar por el orificio. Naturalmente el segundo carrete debía girar más rápido que el primero. Castelli comprobó con mediciones que la velocidad del hilo después del orificio en la placa, era mayor que antes de dicho orificio, en una proporción inversa de los grosores respectivos. “Lo que hay que considerar atentamente –dijo- es que las partes del hilo antes del agujero tienen cierto grosor y las que salen del agujero son más finas, pero de todos modos el volumen y el peso del hilo que se desenrolla siempre son iguales al volumen y al peso del hilo que se enrolla”.

Las observaciones de los ríos y los joyeros dieron sus frutos. El 12 de noviembre de 1625 Castelli escribía a Galileo para informarle que había demostrado geoméricamente “que la proporción entre la cantidad de agua que escurre por un río cuando

Figura 2.3 Técnica de adelgazamiento del hilo de oro o plata por parte de los orfebres



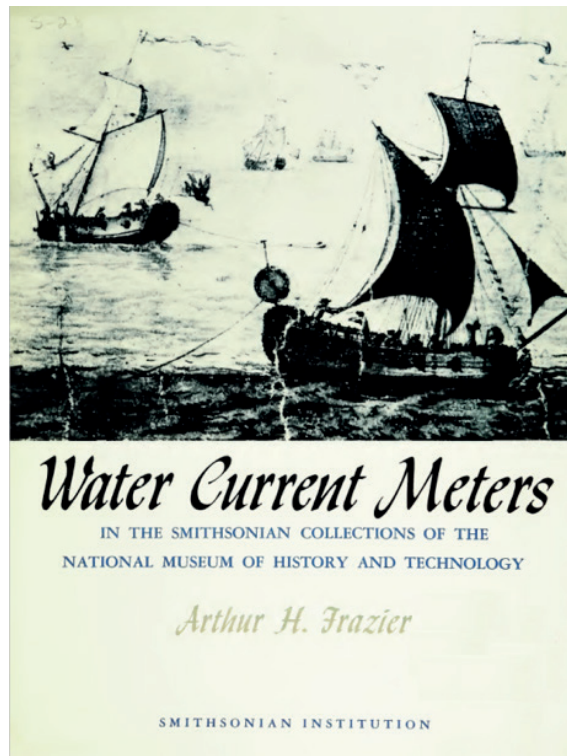
este tiene cierta altura de agua y la que escurre en el mismo río cuando tiene otra altura, está en razón compuesta de la velocidad con la velocidad y de la altura con la altura". Galileo contesta que la proposición le parece muy clara. Este resultado, que se refiere evidentemente a ríos de sección rectangular, aparece en el libro de Castelli de 1628 llamado "De la medición de las aguas corrientes", y expresado en forma más general en la proposición II, al reemplazarse la palabra altura, o sea tirante de agua, por la palabra sección. Si se indica el gasto con Q , con A el área de la sección, con V la velocidad y con subíndices 1 y 2 las dos secciones, lo enunciado puede escribirse como $Q_1/Q_2=(V_1/V_2)(A_1/A_2)$. Si como se hace actualmente, se uniforman las unidades de medida, expresando por ejemplo las áreas en m^2 , las velocidades en m/s y los gastos en m^3/s , se llega a la famosa Ecuación de Castelli.

$$Q = AV \quad (2.1)$$

Benedetto Castelli ha sido considerado en Italia como "padre de la hidráulica" y su fórmula se ha conocido como "ley de Castelli". Esta atribución ha sido posteriormente controvertida, porque otros antes que él habían tenido un conocimiento por lo menos parcial de ella. Como se había mencionado, Leonardo Da Vinci ya había enunciado claramente la Proposición I y la había demostrado de manera muy parecida; sin embargo, la atribución parece merecida porque Castelli fue buscando este principio con tesón, perfeccionándolo poco a poco y, una vez establecido, lo fue aplicando sistemáticamente para resolver gran cantidad de problemas hidráulicos.

Presentado lo anterior, en lo que sigue, se muestra un muy breve resumen de notas históricas de los aforos y de los antecesores del molinete actual. La totalidad de lo presentado se ha tomado del libro *Water Current Meters in the Smithsonian Collection of the Museum of History and Technology*, escrito por Arthur H. Frazier y publicado en 1974, excepto donde se indique otra fuente.

Figura 2.4 Portada del libro de Arthur H. Frazier



2.1. LOS PRIMEROS INTENTOS PARA AFORAR

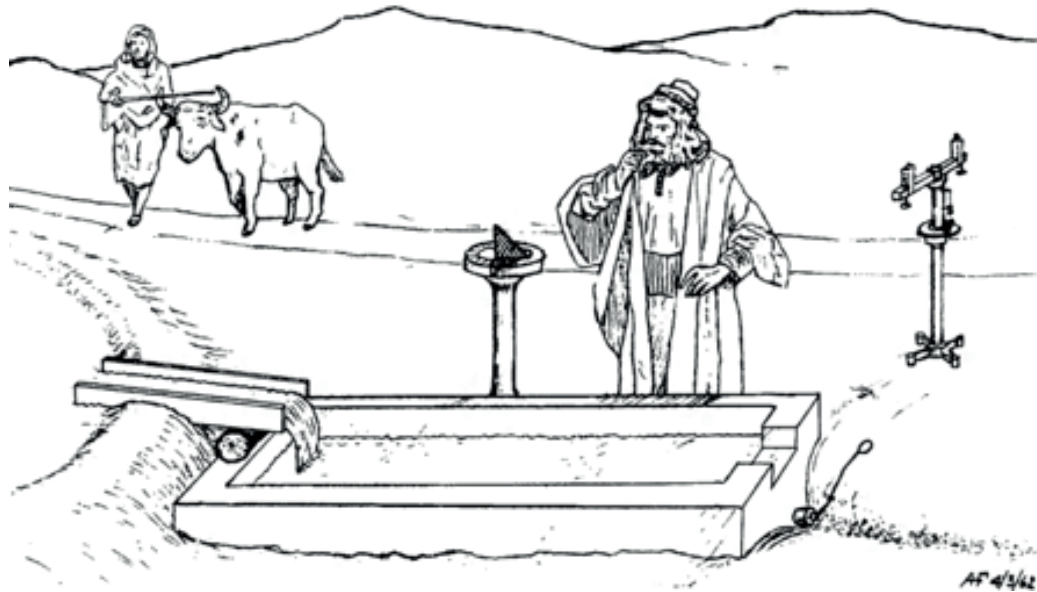
Según indica Frazier, el primer intento de medición de gasto registrado en la historia está en el libro *Dioptra*, escrito por el matemático y mecánico griego Hero de Alejandría en el primer siglo de nuestra era. Como se puede observar en la Figura 25¹, Hero de Alejandría proponía construir un tanque a la orilla de la corriente para llenarla de agua mientras se medía el tiempo con un reloj solar. El sentido común hace pensar que tal propuesta es difícil de realizar en la práctica y ya en el texto

citado de Hero no es evidente que su propuesta se haya realizado. Si se pudiera realizar sería únicamente para corrientes extremadamente pequeñas dado que el tiempo de llenado debería ser amplio por el tipo de registro del tiempo (reloj solar). Hero propone incluso tiempos del orden de días.

Otro apunte muy importante para la historia del aforo, es la interesante observación de Hero de Alejandría (mencionada por Frazier) de considerar la velocidad del agua para el cálculo del gasto y no solamente el área de la sección transversal que ocupa el flujo. A saber: durante mucho tiem-

1 El autor del dibujo es el mismo Frazier, autor del libro; así, el dibujo es su interpretación de lo que se lee en el libro de Hero de Alejandría.

Figura 2.5 Primer aforador registrado de la historia



(Fuente: Frazier, 1974 p. 5)

po, incluso aún en estos días, se ha considerado a la cantidad de agua como una función única del área hidráulica (sección transversal que ocupa la corriente); es decir, que el gasto es igual al área. Ya Hero de Alejandría sugería que se debiera considerar qué tan rápido o lento entra el agua al tanque. Sin embargo, se detiene únicamente en observarlo, ya que solo lo menciona y termina proponiendo el método volumétrico para conocer el gasto; el cual de esta forma queda correctamente designado en cuanto a las unidades (volumen entre tiempo).

2.2. FLOTADORES LIBRES

Uno de los precursores de la medición de la velocidad del flujo fue el célebre genio medieval Leo-

nardo Da Vinci. Él propuso un sencillo dispositivo consistente en una ramita con un flotador en un extremo y un lastre o contrapeso en el otro. Con este dispositivo Leonardo no se proponía medir el gasto, más bien trataba de comprobar la vieja idea de que en las corrientes, el agua escurría más rápidamente en el fondo que en la superficie. Leonardo describió correctamente la distribución real de las velocidades en el interior de una corriente. Para ello propuso su dispositivo y realizó innumerables experimentos variando la longitud de la ramita para “sondear” toda la profundidad del agua. Incluso la manera de medir el tiempo era musical; es decir, mientras caminaba cantaba diez veces la escala musical completa subiendo y bajando los tonos. Claro está que y tenía “calibrado” el tiempo en que tardaba en recorrer la escala

musical. Se dice que prefería cantar para medir el tiempo, en lugar de utilizar su pulso como contador de tiempo, por ser el primero más exacto que el segundo. Lo anterior también se puede leer en el libro de Frazier.

En la Figura 2.7 , se tiene una interpretación gráfica de lo que hacía Leonardo, puede observarse que también usaba un dispositivo para medir la distancia, ahora se les llama “odómetros”. Probablemente también es una invención del mismo Da Vinci y no es un dispositivo sencillo como se puede observar y suponer.

Figura 2.6 Flotador de Da Vinci para medir la velocidad



(Fuente: Frazier, 1974 p. 10)

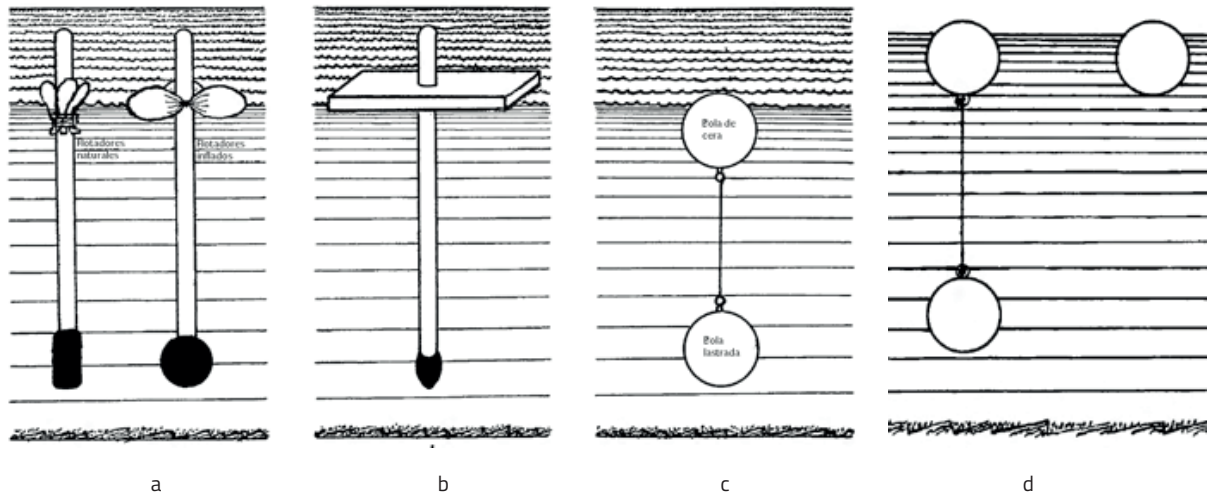
Figura 2.7 Leonardo Da Vinci midiendo las velocidades



(Fuente: Frazier, 1974 p. 11)

Leonardo da Vinci vivió entre los años 1452 y 1519, así que sus experimentos sobre la distribución de las velocidades en una corriente, muy probablemente los realizó alrededor del año 1500. Benedetto Castelli propuso formalmente el cálculo del gasto considerando la velocidad y el área en 1628. Así que pasaron más de 100 años entre un evento y otro, periodo en el que la medición de la velocidad en las corrientes no tuvo atención. Frazier menciona que mientras Castelli proponía su fórmula y hacía mirar la importancia de la velocidad, otros investigadores usaban flotadores parecidos a los de Leonardo.

Figura 2.8 Diferentes flotadores usados en el siglo XVII



(Fuente: Frazier, 1974 p. 12)

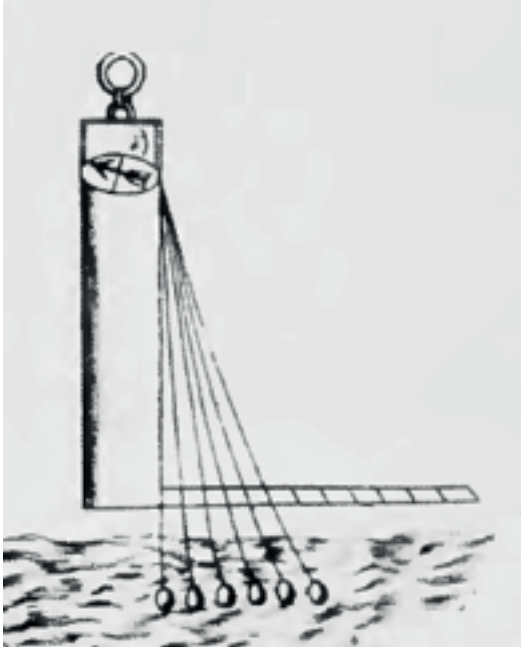
En la Figura 2.8, se pueden ver diferentes flotadores usados en el siglo XVII: en el año 1646 el monje jesuita italiano Niccolo Cabeo uso un flotador utilizando tanto flotadores naturales como flotadores inflables (a); en año 1663 el ingeniero italiano Giovanni Battista Barattieri usó un flotador con una base de madera como elemento boyante (b) y el físico francés Edmé Mariotte en el año de 1680 utilizó un dispositivo de doble bola, una hecha de cera y la otra lastrada para que se sumergiera. También se conoció una variación del flotador de Mariotte diseñado por Vincenzo Brunacci quien en 1805 (d), propuso un flotador doble consistente en el mismo flotador de Mariotte pero acompañado de una bola flotadora adicional completamente suelta que viajaba libremente a la par del flotador doble. La velocidad de la bola suelta debe ser mayor porque no es retenida por la bola lastrada sumergida.

De tal manera que en un mismo tiempo se podía conocer la velocidad del agua en la superficie y la velocidad del agua a la profundidad que estaba la bola sumergida (Frazier, 1974).

2.3. FLOTADORES FIJOS

Frazier menciona que la llegada de los flotadores libres se vio seguida de la aparición de los flotadores fijos. Estos flotadores eran más pesados que el agua y estaban atados a una cuerda de manera que no flotaban libremente, más bien se veían limitados a avanzar solo la distancia que la cuerda les permitía. El antecesor del flotador fue un dispositivo presentado en el folleto "Nuove Inventioni di Camillo Agrippa", publicado en el año de 1595 (Frazier, 1974).

Figura 2.9 Medidor de velocidad de barcos de Camillo Agrippa



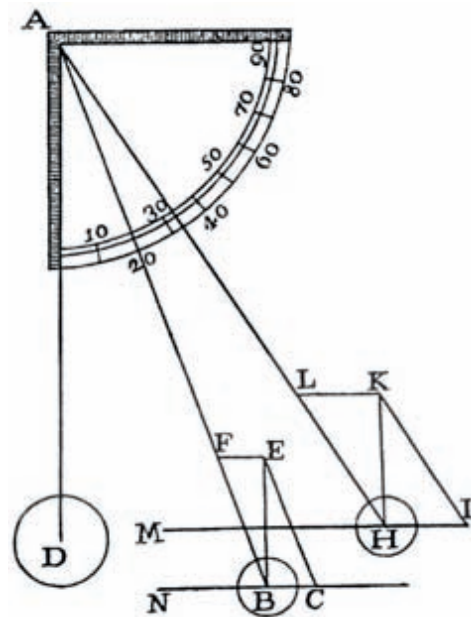
(Fuente: Frazier, 1974 p. 14)

Como se puede ver en la Figura 2.9, el dispositivo consistía en una gran escuadra colocada estratégicamente en el barco, con su brazo inferior graduado y suspendido cerca de la superficie del agua. En función de qué marca de graduación cruzaba el hilo del cual pendía el flotador, así era la velocidad del barco.

Un célebre científico italiano se interesó mucho en este medidor, se trató del célebre Domenico Guglielmini, aunque no se sabe si supo directamente del aparato de Camillo Agrippa pero publicó un libro llamado *Aquarium Fluentum Nova Methodo*

Inquisitia en el que describía un aparato llamado “cuadrante y bola” que funcionaba con el mismo principio que el de Agrippa, aunque tenía una escala circular en la que se medían ángulos en lugar de distancias. En la Figura 2.10, se puede ver dicho aparato y se puede apreciar que Guglielmini calculó alguna relación entre dos posiciones de la bola lastrada.

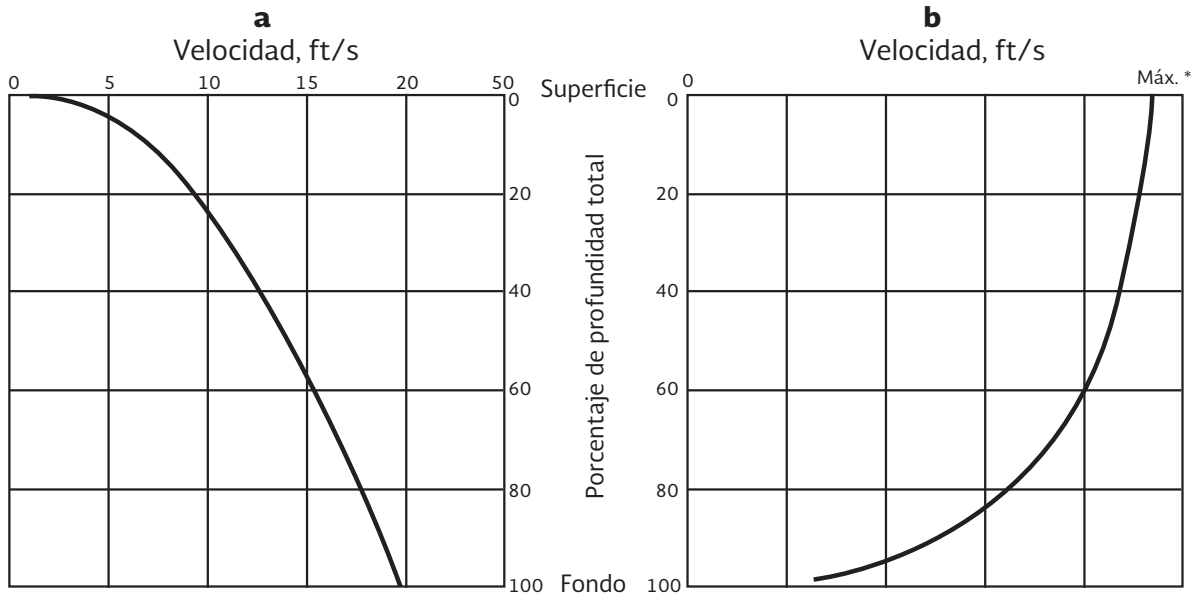
Figura 2.10 Cuadrante y bola de Guglielmini



(Fuente: Frazier, 1974 p. 15)

Sin embargo, algo salió mal puesto que en una gráfica se presenta la distribución de velocidades en una corriente, pero se tiene la concavidad hacia abajo cuando se sabe actualmente que dicha concavidad es hacia arriba (Figura 2.11).

Figura 2.11 Distribución errónea de las velocidades en una corriente según Gugliemmini (a) y distribución correcta (b)

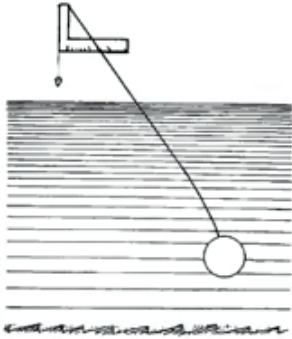


(Fuente: Frazier, 1974 p. 16)

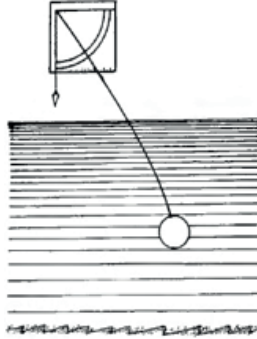
A pesar de sus errores Guglielmini tuvo muchos seguidores. Como se puede ver en la Figura 2.14 los primeros cuatro modelos tienen gran parecido con el modelo de Guglielmini. En los modelos *c* y *d* se sustituyó la bola por una barra. En los modelos *e* y *f* se sustituyó el cuadrante por escalas, una

parecida a un mecanismo de relojería (*e*) y en la otra se usó lo que ahora se conoce como dinamómetro (*f*). Los modelos *h* y *g* presentan innovaciones que aunque mucho más engorrosas para su uso en aguas profundas y rápidas, podrían evitar el error en que incurrió Guglielmini.

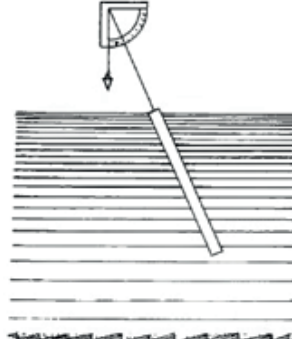
Figura 2.12 Diferentes modelos de medidores basados en contrapesos



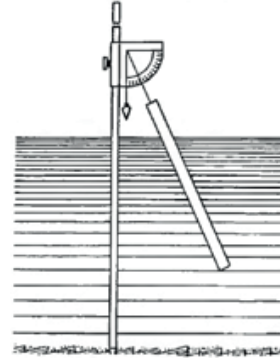
a. Escuadra de Cava, 1721.



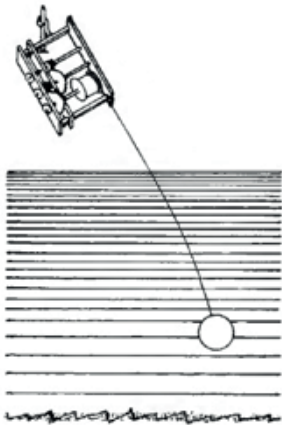
b. Cuadrante de Ximenes, 1752.



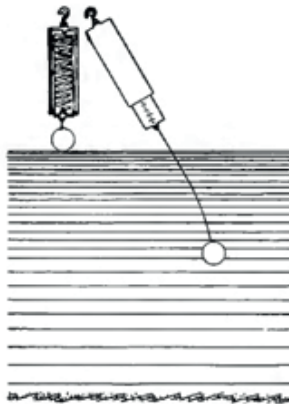
c. Barra seccional de Ferrari, 1796.



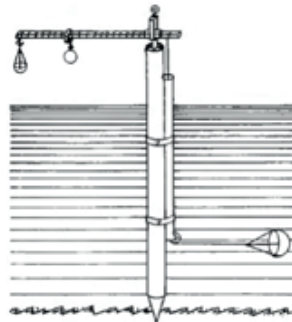
d. Péndulo compuesto de Venturoli, 1796



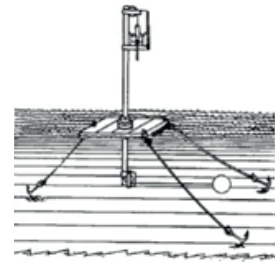
e. Dispositivo con resorte de relojería de Ximenes, 1752.



f. Dispositivo de resorte de escala de Ximenes, 1752.



g. Dispositivo de Lorgna, 1777.



h. Contrapeso hidráulico de Barbantini, 1814.

(Fuente: Frazier, 1974 p.17)

2.4. PALETAS

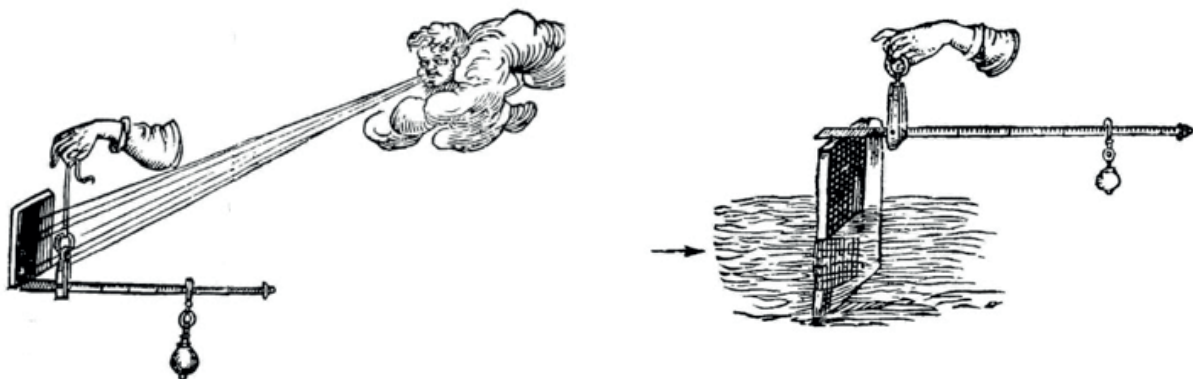
Santorio Santorio (1561-1636) fue un médico italiano innovador en muchos aspectos de la medicina. Sin embargo, Frazier hace la observación de que también propuso inventos de otro tipo, por ejemplo, propuso unas balanzas para medir el impacto del viento y del agua. Se supone que la utilidad de tales artefactos estaba relacionada con cuándo la fuerza del agua o del viento son benéficas y cuándo son perjudiciales. Es así que propuso las balanzas ilustradas en la Figura 2.13.

Transcurrió un siglo y medio para que los dispositivos de paletas se utilizaran como medidores de velocidad en corrientes. En seguida se muestran los dispositivos que presenta Frazier en su libro.

Los primeros indicios de tales medidores datan de 1779, fecha en la que el ingeniero francés Emiland Marie Gauthey (1732-1806) propuso un par de medidores, muy probablemente influenciado por las propuestas de Santorio (Figura 2.14). En la primera figura se puede apreciar que el modelo es bastante parecido al de Santorio y en la segunda se tiene la innovación de una escala de resorte.

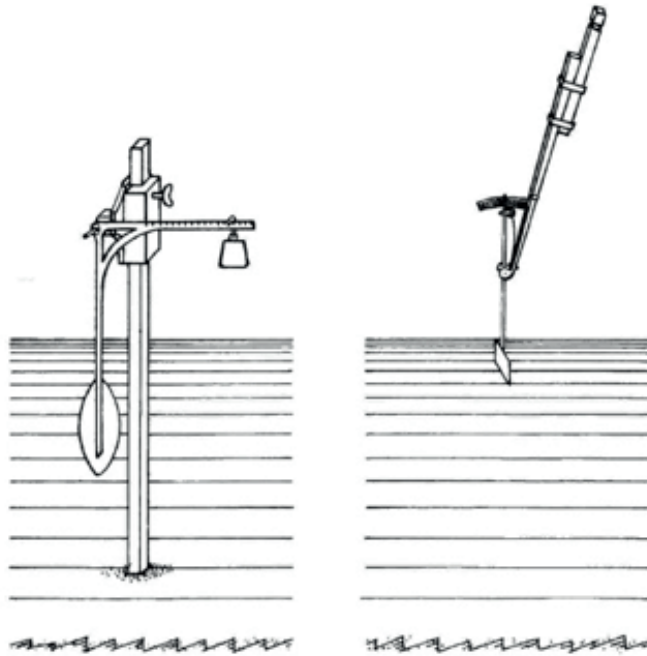
Por otro lado, en el año de 1780, Leonardo Ximenes (1716-1786) propuso tres medidores cuyo elemento primario era una paleta. En la Figura 2.15 se puede ver que el primer dispositivo servía para medir únicamente la velocidad superficial, mientras que los otros dos servían también para medir velocidades en el interior de la corriente.

Figura 2.13 Balanzas de Santorio para medir el impacto del viento y de la corriente de agua



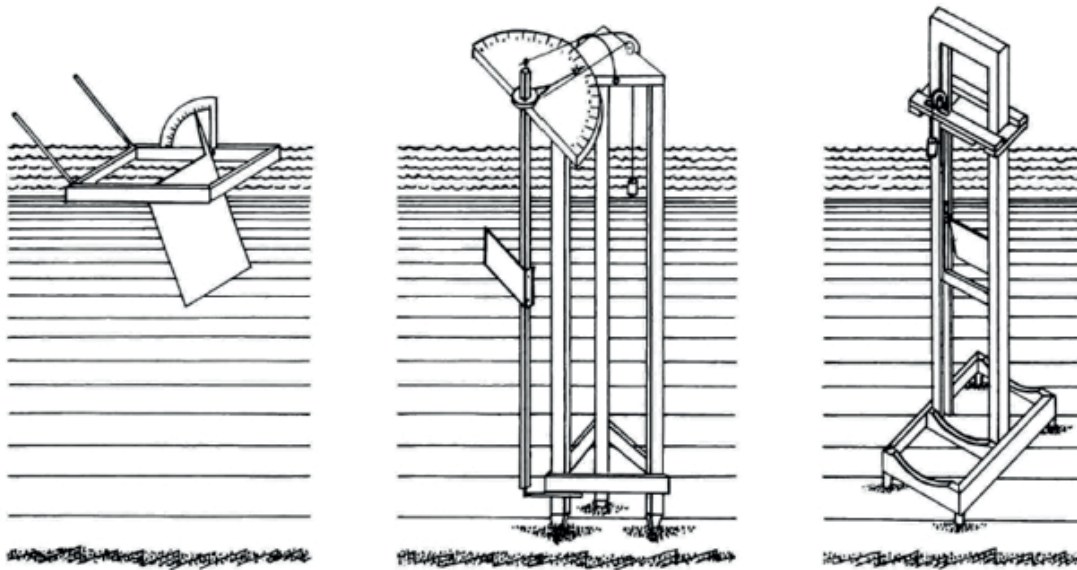
(Fuente: Frazier, 1974 p. 18)

Figura 2.14 Medidores de paleta de Gauthey, 1779.



(Fuente: Frazier, 1974)

Figura 2.15 Tres medidores de Leonardo Ximenes, 1780.

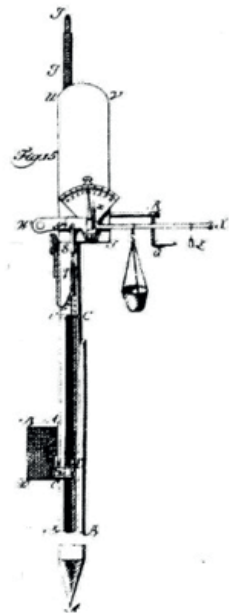


(Fuente: Frazier, 1974 p. 19)

En el primer modelo, la placa resiste únicamente en virtud de su peso propio, en cambio en las otras dos, el empuje del agua se balancea con unos contrapesos. En el segundo modelo, la placa gira sobre un eje vertical a diferencia de todos los anteriores. En el tercer modelo, el empuje del agua se contrarresta tanto con un contrapeso como con el peso propio de la paleta o placa.

A partir de los primeros modelos de medidores de velocidad basados en las paletas se han desarrollado diversas propuestas, por ejemplo el modelo desarrollado por el ingeniero hidráulico holandés Christiaan Bruning (1736-1805). En la Figura 2.16

Figura 2.16 Medidor de corriente de Christiaan Bruning (1788)



(Fuente: Frazier, 1974 p. 19)

se puede observar que en su dispositivo, el impacto del chorro tendía a empujar la placa plana hacia atrás, pero el movimiento se contrarrestaba con un contrapeso en una balanza colocada en el extremo superior de la varilla de soporte. Las lecturas obtenidas del peso requerido para establecer un equilibrio podrían convertirse en cifras que representaban la velocidad del agua. Se puede apreciar lo anterior de manera general, dado que la calidad de la imagen no permite apreciar los detalles. Pero en la parte baja se puede ver la placa o paleta que recibe el empuje del agua y en la parte superior se observa una placa circular con graduaciones donde se registraba la posición de la aguja que tenía relación directa con el empuje que ejercía el agua en la placa sumergida.

2.5.MEDIDORES DE RUEDA DE PALETAS

El nombre de molinete hace suponer que el antecedente histórico del dispositivo es la rueda de paletas, simplemente por la semejanza visual y funcional de la rueda de paletas con un molino. Según Frazier (1974) el primer registro del uso de la rueda de paletas era para medir la velocidad de los barcos. El registro de tal equipamiento se encuentra en el primer volumen del libro sobre Arquitectura de Vitrubio². Este dispositivo se usó tanto para medir la velocidad de los barcos como para medir la velocidad superficial del agua, siendo

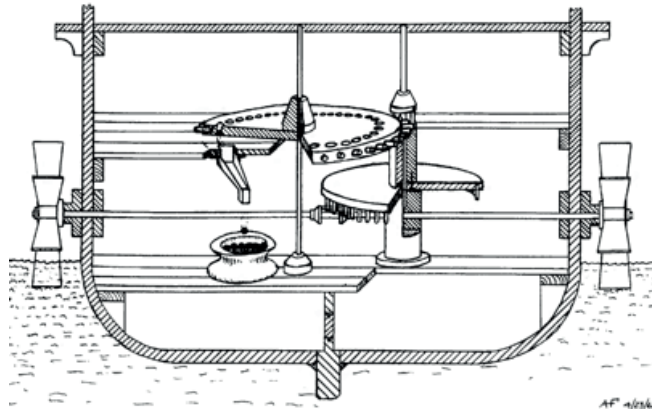
2 Marco Vitruvio Polión (80-70 a. C.-15 a. C.) fue un arquitecto, escritor, ingeniero y tratadista romano del siglo I a. C.

el primer uso el de los barcos. Se trataba de un par de ruedas de paletas colocadas en los costados de la embarcación y por medio de ingeniosos mecanismos se hacían caer piedras en un contenedor en una cantidad función de los giros de las paletas (Figura 2.17), con lo que se tenía la velocidad del barco al saber en qué tiempo caía cada piedra en el contenedor. Después, contando todas las pie-

dras que caían, se tenía una idea de la distancia total recorrida por el barco.

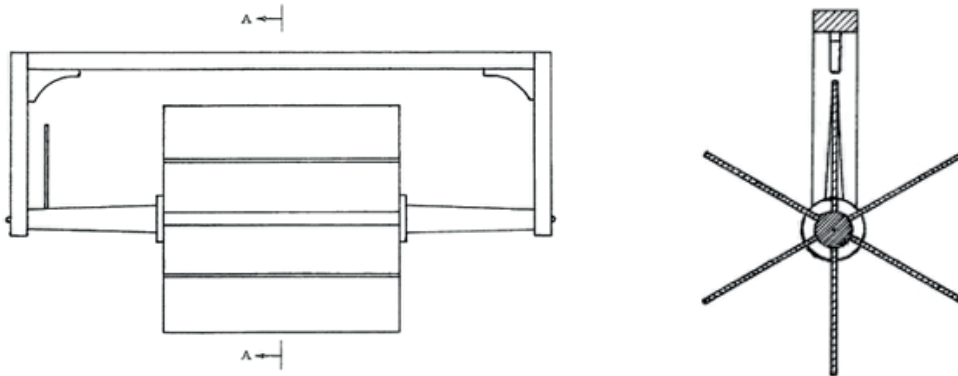
La primera rueda de paletas construida específicamente para medir la velocidad en corrientes, fue construida por Luigi Ferdinando Marsili (1658-1730) en ocasiones llamado también Marsigli.

Figura 2.17 Ruedas de paletas para calcular la velocidad y distancia recorrida por las embarcaciones



(Fuente: Frazier, 1974 p. 22)

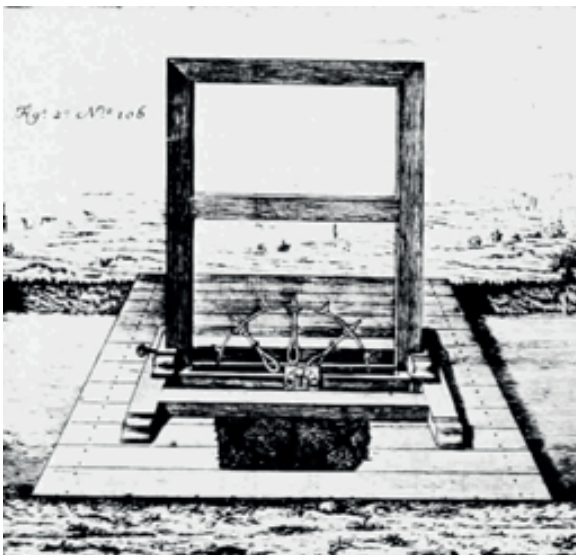
Figura 2.18 Rueda de paletas de Marsili



(Fuente: Frazier, 1974 p. 23)

Frazier hace la observación de que varios escritores, desacreditando a Marsili, afirman que Francesco Domenico Michelotti (1710-1777) fue el creador del medidor basado en una rueda de paletas. El dispositivo de Domenico se muestra en la Figura 2.19.

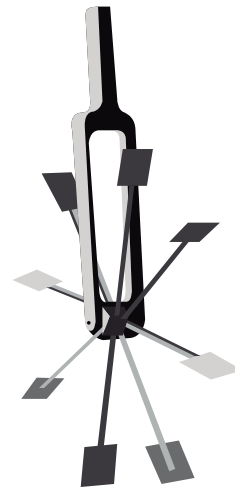
Figura 2.19 Rueda de paletas de Francesco Domenico Michelotti (1760)



(Fuente: Frazier, 1974 p. 25)

Como puede observarse, la rueda giratoria de Michelotti era pesada, por lo que en 1780, otro investigador, el ingeniero francés Pierre Louis Georges Dubuat (1734-1809) ideó una rueda mucho más pequeña de apenas unos 319 gr y unos 60 cm de diámetro. De paso, se puede notar que los avances en hidráulica pasaron de Italia a Francia.

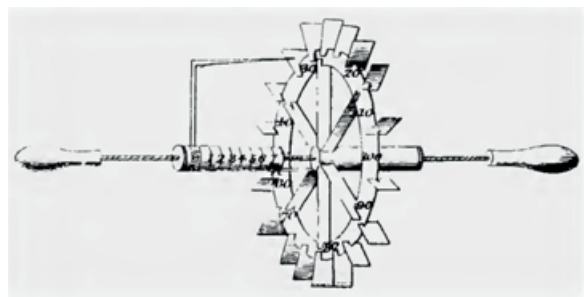
Figura 2.20 Rueda de paletas de Dubuat (1780)



(Fuente: Frazier, 1974 p. 27)

Las ruedas de paletas continuaron usándose y se les adicionó elementos mecánicos como engranes de relojería para facilitar el conteo de las vueltas. Por ejemplo, una innovación a la sencilla rueda de paletas de Dubuat, la realizó el científico, naturalista escocés, inventor y escritor David Brewster en 1868.

Figura 2.21 Rueda mecanizada de Brewster, 1868



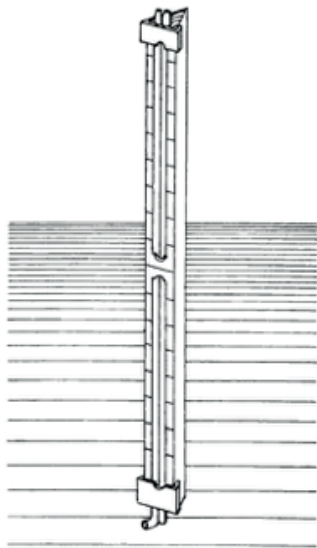
(Fuente: Frazier, 1974 p. 27)

2.6. EL TUBO DE HENRI PITOT

Frazier, el multicitado autor del libro, fuente original de lo aquí presentado, abre un pequeño paréntesis en el desarrollo de los medidores basados en las ruedas de paletas, para mostrar el dispositivo llamado “tubo de Pitot”.

Las ruedas tenían una gran desventaja, solamente medían la velocidad superficial, ya que no podían sumergirse y funcionar adecuadamente. Tal vez pensando en solucionar este inconveniente el gran académico francés Henri Pitot (1695-1771) ideó una maravilla tecnológica. Su invento estaba montado en una barra de madera triangular.

Figura 2.22 Medidor de Henri Pitot, 1732

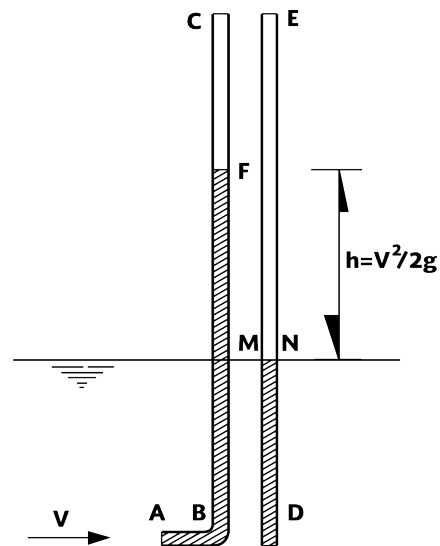


(Fuente: Frazier, 1974)

Variaciones más complejas de este dispositivo son muy usuales en la aeronáutica y trabajan de la siguiente manera, según lo narra el doctor Levi (Levi, 1985).

¿Cómo era ese increíble aparato de Pitot? Muy sencillo, por cierto: en la barra triangular se apoyaban dos tubos de vidrio, uno recto DE y otro doblado ABC.

Figura 2.23 Funcionamiento del tubo de Pitot



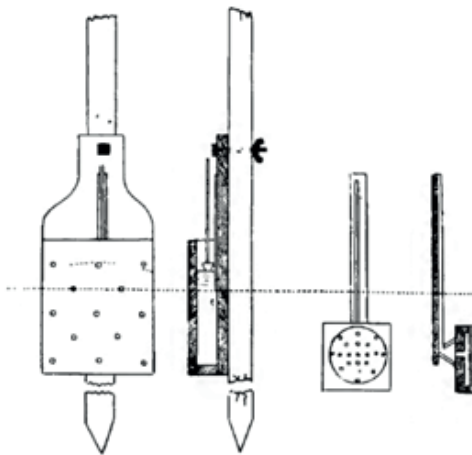
(Fuente: Levi, 1985 p. 267)

El agua sube por vasos comunicantes en DE hasta el nivel MN de la superficie libre del agua; pero en el tubo ABC, si éste se dirige hacia la corriente, tendrá que subir por encima de dicho nivel de altura MF, igual a la carga de velocidad $V^2/2g$. Por tanto, si se utiliza, como hacía Pitot, una regla graduada corregida en $V=(2gh)^{1/2}$, y se coloca su cero al nivel M, en F podrá leerse directamente la velocidad de la corriente.

Naturalmente, como prevenía Pitot, hay que asegurarse de que AB esté orientado correctamente en dirección del filete fluido; por lo que recomendaba girar suavemente la barra hasta que el extremo F de la columna MF subiera lo más alto posible.

Puede deducirse fácilmente que el extremo del tubo puede sumergirse cuanto se desee, con el único inconveniente de poder sostener el tubo. Además se tiene otro inconveniente: el agua dentro del tubo oscila en función de la corriente por lo resultaba incómodo leer la velocidad en la regla graduada. Para ello Dubuat hizo algunas modificaciones (Figura 2.24).

Figura 2.24 Modificaciones de Dubuat al tubo de Pitot



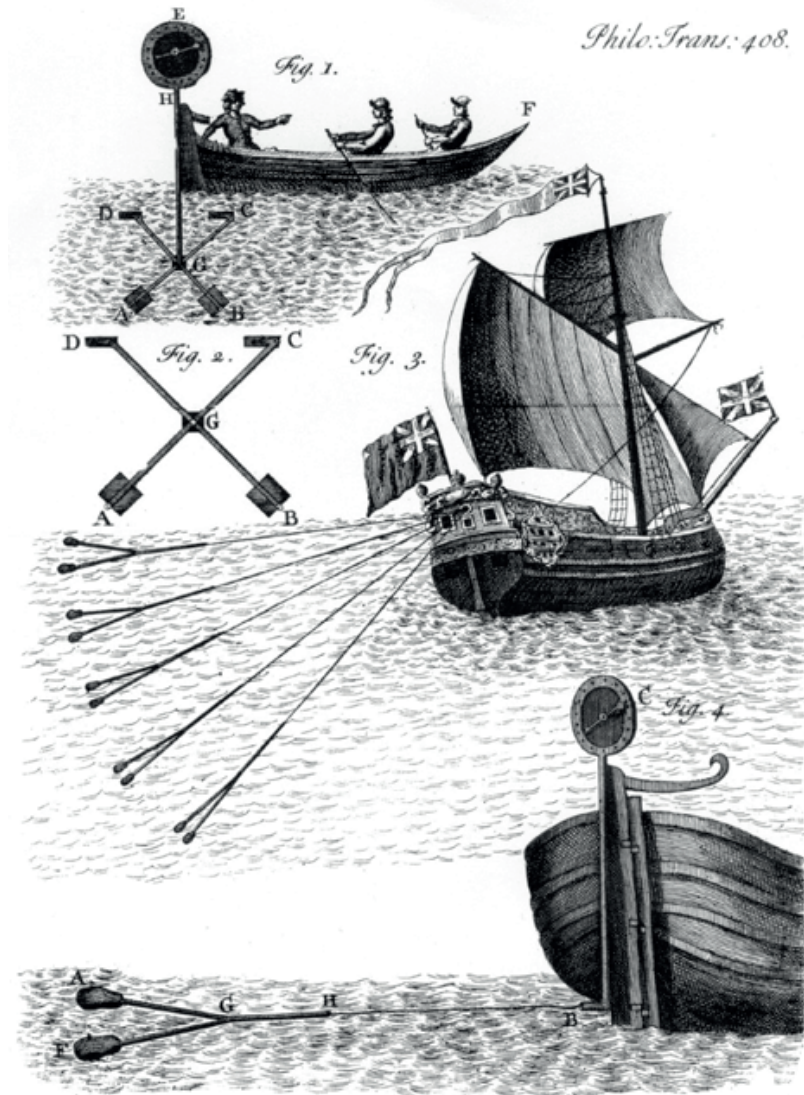
(Fuente: Frazier, 1974, 26)

Al tener varias perforaciones, el agua dentro del receptáculo se mueve menos y además su uso se facilitó más con el pequeño flotador que Dubuat adicionó.

2.7. ROTORES

Ya se ha mencionado que una desventaja de las ruedas de paletas es su imposibilidad de sumergirse. La rueda se coloca en cerca de la superficie y solamente unas paletas se sumergen en el agua y las otras permanecen fuera, de tal manera que las paletas sumergidas reciben el empuje del agua y las que están fuera no; ello provoca que la rueda gire. Si toda la rueda se sumerge todas las paletas recibirán el empuje del agua y la rueda no girará. Para subsanar tal desventaja se realizaron algunas modificaciones a la ruedas de paletas. Primeramente se cambió el eje de rotación de horizontal a vertical y para salvar el hecho de que todos las placas reciban el mismo empuje se introdujo una ingeniosa modificación: se inclinaron algunas paletas respecto a la dirección del agua, de manera que La magnitud del empuje era menor cuando impactaba de frente a las paletas que no se inclinaron. Esta innovación la presentó Henry De Saumarez en el año de 1715. Dicha innovación la presentó en ocasión de un concurso que se lanzó en la Gran Bretaña para que tener soluciones a la problemática de que los barcos tenían inconvenientes por no saber qué longitud recorrían cuando estaba en el mar (De Zoumarez, 1729). Saumarez no ganó el concurso pero su propuesta fue importante. Su dispositivo se muestra en la Figura 2.25, y por otro lado, en la Figura 2.26 se aprecia una réplica del dispositivo que actualmente se encuentra en el museo Smithsonian (Frazier, 1974). Nótese que el eje de giro del rotor tiene una disposición vertical.

Figura 2.25 Propuestas de Henry De Soumarez, 1715.



(Fuente: De Soumarez, 1729 p.59)

Figura 2.26 Réplica del rotor de paletas de Henry Soumarez, 1715.

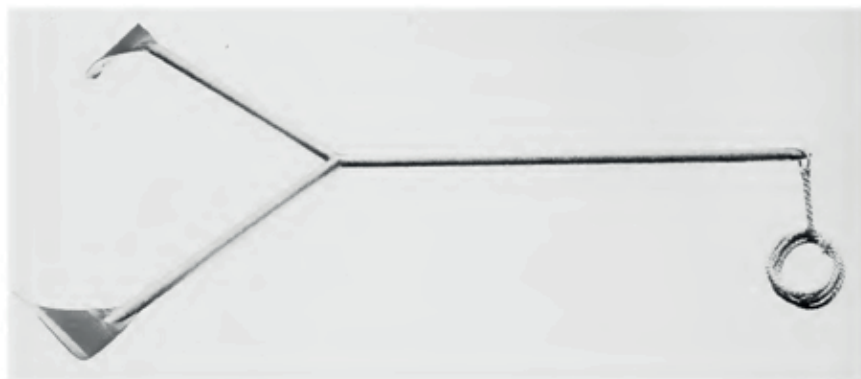


(Fuente: De Soumarez, 1729 p.59)

En la Figura 2.25 anterior, también se puede ver un rotor conformado por una varilla metálica en forma de “Y” que tiene un par de pequeñas paletas o placas dobladas convenientemente para girar al recibir el empuje del agua. Tanto el rotor de paletas como el rotor de varilla se propusieron para medir el recorrido de los barcos. En la Figura 2.27 se aprecia el rotor de varilla que gira preferentemente en una disposición horizontal; también es una réplica del museo Smithsonian (Frazier, 1974)

Estos dos medidores de De Soumarez, a pesar de ser dispositivos para la navegación, marcaron el inicio de dos grandes categorías de medidores giratorios: los de eje vertical (como el rotor de paletas) y medidores de eje horizontal (como el rotor de varilla en “Ye”). En lo que sigue se presentarán ambos tipos.

Figura 2.27 Réplica del rotor de varilla en “Ye” de De Soumarez, 1716.



(Fuente: Frazier, 1974 p. 46)

2.8. MOLINETES DE EJE HORIZONTAL³

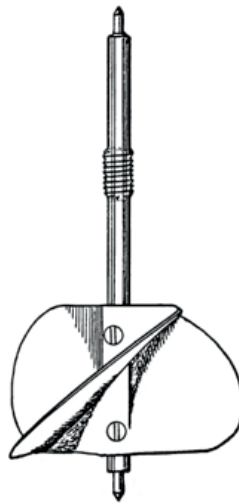
Los molinetes, tanto de eje horizontal, como los de eje vertical, son ampliamente mencionados en el libro de Frazier y en seguida se da muestra de ello.

Los medidores de eje horizontal siguieron una pauta marcada por el medidor en “Ye” de De Zoumarez: los elementos primarios que recibían el empuje del agua no eran placas planas ni paletas. En seguida se presentan, primeramente, los desarrollos europeos y posteriormente las

contribuciones hechas en Estados Unidos, cuyos ingenieros pronto se sumaron a la carrera de propuestas para la medición de corrientes.

Curiosamente antes de De Soumarez, Robert Hooke -el mismo que propuso la ley de la elasticidad que lleva su nombre- propuso en 1683 un rotor con varios usos, entre ellos la medición de la velocidad (Figura 2.28). Nótese el desarrollo revolucionario de los elementos curvos que giraban por el empuje del agua. Aunque al parecer no marcó gran influencia para los inventores posteriores, al menos a los que lo sucedieron en lo inmediato. Tal vez se adelantó un poco a su tiempo.

Figura 2.28 Posible apariencia del rotor de Robert Hooke, 1683



(Fuente: Frazier, 1974 p. 49)

3 Se hace la advertencia de que en lo subsecuente se utilizará la palabra “molinete” dado que la conformación de estos dispositivos ya es muy parecida a la de los molinetes actuales. El libro de donde se saca la mayor parte de la información (Frazier, 1974) fue escrito en idioma inglés y se usa la palabra *current meter*, cuya traducción literal podría ser “medidor de corriente”; término nada usual en el ámbito de la hidrometría en México.

Después de Hooke y después de De Soumarez, surgió en 1790 la propuesta de Reinhard Woltman. Como puede observarse en la Figura 2.29, se trata de un dispositivo con cuatro elementos distintivos: una barra de soporte; un timón para direccionar las paletas en el sentido más adecuado al flujo; el rotor mismo que se construyó con un par de placas orientadas de tal manera que el empuje del agua obligaba a girar al rotor y por último, se tenía un mecanismo de relojería que auxiliaba en la contabilidad del número de giros. Con este modelo, Waltman marcó la tendencia de este tipo de medidores (eje horizontal) (Frazier, 1974).

Según Frazier, Julien John Revy, austriaco pero avendado en Inglaterra, propuso un molinete que tenía las siguientes características:

1. Los álabes del rotor estaban sujetos a una esfera llena de aire para que pesara menos y tuviera menos fricción.
2. El mecanismo y sus engranes estaban dentro de una cámara que se llenaba con agua limpia para evitar que cuerpos extraños atoraran el mecanismo y el giro del rotor.
3. Cuando estaba en profundidades considerables se le adicionaba una especie de "retenida" para evitar el movimiento del dispositivo por virtud el empuje del agua.
4. El molinete iba montado en una barra.

Figura 2.29 Replica del molinete de Woltman, 1790.



(Fuente: Frazier, 1974 p. 49)

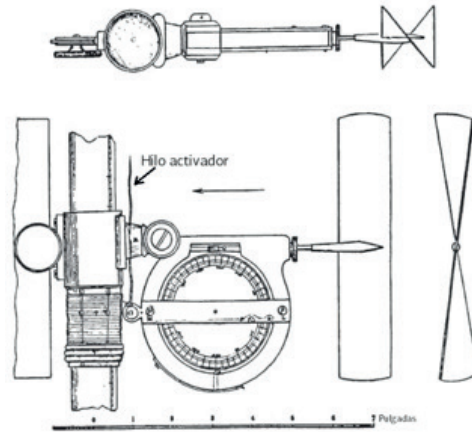
Figura 2.30 Molinete de Révy, 1874.



(Fuente: Frazier, 1974 p. 51)

En 1836, el estadounidense Joseph Saxton presentó un molinete muy eficiente. Frazier explica que en su desarrollo se usaron artes de la relojería, ya que el mismo Saxton era relojero. Puede apreciarse en la Figura 2.31, que entre la barra de soporte y el mecanismo de relojería, se tenía un hilo que desde la superficie se accionaba para iniciar y terminar el conteo. Aún se usa tal aditamento. Frazier también indica que este molinete se calibró en un canal de laboratorio de Londres. Dicha calibración consistió en doblar o desdoblar las aspas hasta lograr que diera un giro por cada pie recorrido.

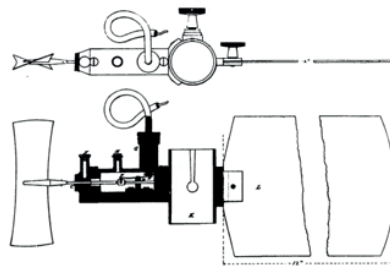
Figura 2.31 Molinete de Saxton. 1836.



(Fuente: Frazier, 1974 p. 54)

Frazier indica que en el año 1877 el general Henry Larcom Abbot, realizó una muy importante innovación al molinete de Saxton: le instaló un circuito eléctrico para contar el número de giros.

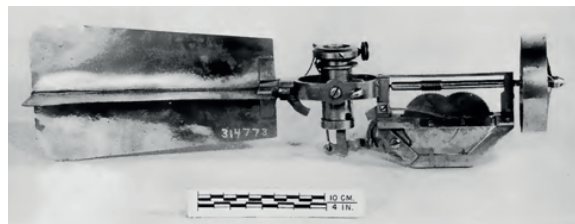
Figura 2.32 Molinete Abbot, 1877



(Fuente: Frazier, 1974 p. 55)

El ingeniero francés Gustave Adolphe Baumgarten (1808-1856) modificó sustancialmente el diseño de Saxton; Frazier parafrasea a Baumgarten: "las paletas relativamente pequeñas de este molinete utilizan sólo una pequeña parte de la fuerza motriz total presente dentro del círculo definido por su rotación; si se hiciera uso de la fuerza total disponible dentro de ese círculo, la fuerza motriz sería mucho mayor. De hecho, un rotor de dimensiones mucho más pequeñas probablemente podría usarse sin ningún sacrificio de potencia". Con tales intenciones, Baumgarten sustituyó las paletas por una especie de rotor parecido a una turbina (Figura 2.33).

Figura 2.33 Molinete de Baumgarten, 1846.



(Fuente: Frazier, 1974 p. 58)

Frazier hace mención al hecho de que el medidor de Baumgarten se utilizó ampliamente en los Estados Unidos a inicios de los años 1870, por parte del General Theodore Grenville Ellis (1829-1883). Pero antes de utilizarlo se reporta el uso de una ecuación para tal efecto. Se cita textualmente a Frazier:

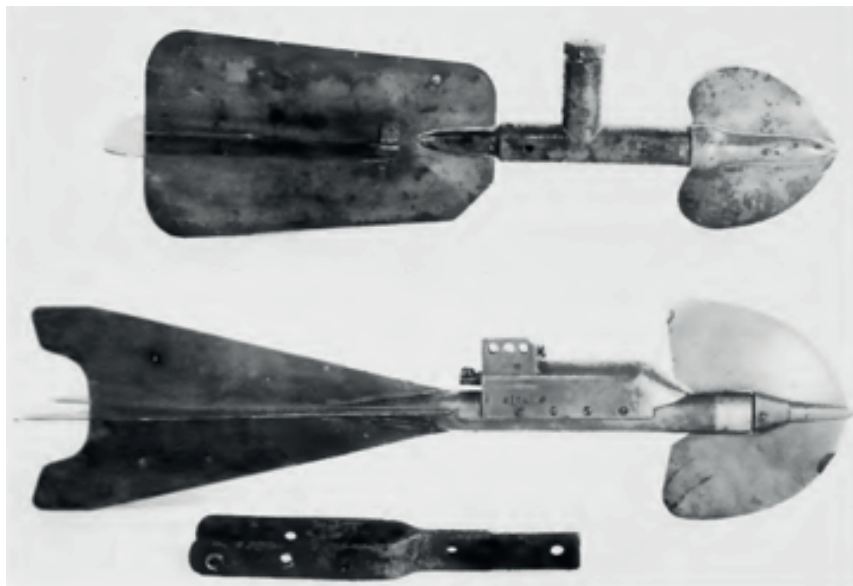
Antes de que Ellis usara el molinete de Baumgarten, tenía que establecer una ecuación que mostrara la relación entre el número de pies por segundo (f), al cual el agua fluía y el número de revoluciones por segundo (N), realizado por el rotor. Ellis hizo un ajuste en 1870 y otro en 1874, y encontró que para velocidades entre 0.7 y 9.0 pies por segundo esa ecuación era: $f = 5/12 n + 0.25$ en ambas ocasiones, sin

embargo, se percató de que el medidor fallaba por debajo de 0,7 pies por segundo.

En virtud de lo anterior, el general Ellis propuso en 1874 un molinete de copas de eje vertical; que ya había sido propuesto antes por Daniel Farrand Henry, pero era más pequeño. El nuevo molinete tuvo un desempeño superior y en sus proyectos subsecuentes el general Ellis utilizó el nuevo molinete.

También en los Estados Unidos el ingeniero William Hammond Hall (1846-1934) en el año de 1880 desarrolló un molinete que tenía un rotor diferente, que se montaba en una barra fija o se colgaba de un cable (Figura 2.34).

Figura 2.34 Molinete del ingeniero Hall, 1880



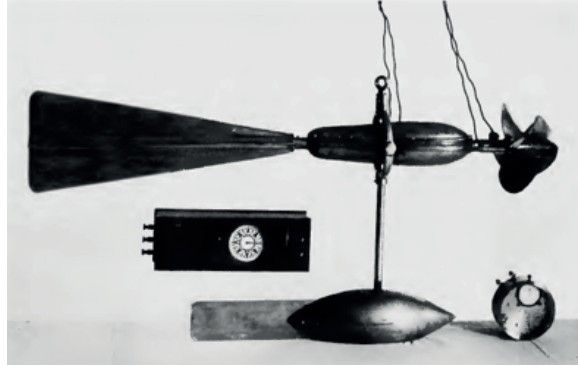
(Fuente: Frazier, 1974 p. 64)

Por otro lado, Frazier escribe que alrededor del año 1885, el ingeniero Eugene Elwin Haskell desarrolló un molinete con un rotor cónico de álabes helicoidales e incluyó una brújula para indicar la dirección cardinal de las corrientes. Como se observa en la Figura 2.35 ya su molinete incluía un escandallo y tenía contador eléctrico de giros. La brújula era propiedad intelectual del fabricante Edward Samuel Ritchie.

El molinete Haskell, era grande y engorroso para su uso en corrientes someras. El Departamento de Irrigación de los Estados Unidos desarrolló en 1889 uno más pequeño (Figura 2.36). Como puede verse resultó de unos 35 cm de longitud.

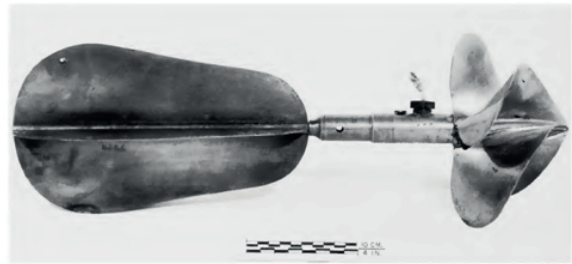
Es notorio que los molinetes anteriores se desarrollaron en los Estados Unidos; en Europa también se tuvieron propuestas. Por ejemplo, Frazier menciona que el molinete desarrollado por Benjamin T. Moore, fue patentado tanto para su uso en la medición de corrientes como para medir la velocidad de los barcos (Figura 2.37).

Figura 2.35 Molinete Ritchie-Haskell, 1885.



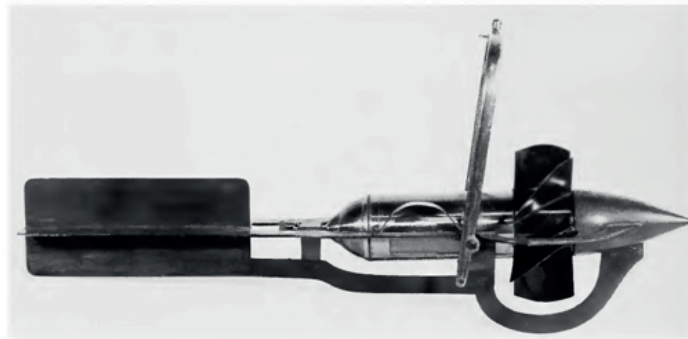
(Fuente: Frazier, 1974 p. 65)

Figura 2.36 Molinete de Departamento de Irrigación, 1889.



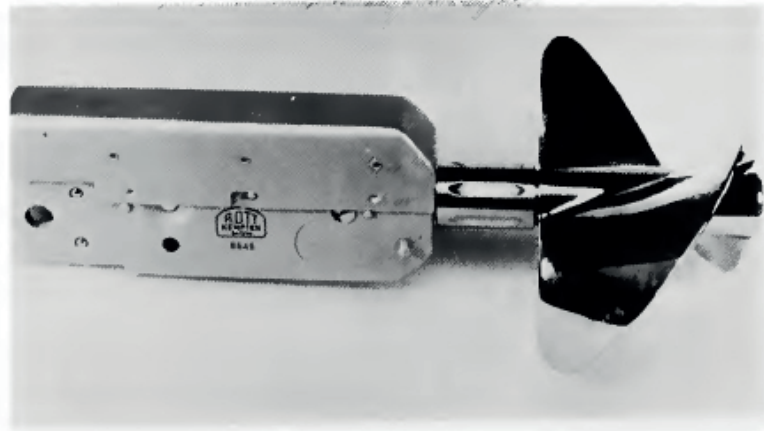
(Fuente: Frazier, 1974 p. 66)

Figura 2.37 Molinete Moore, 1875.



(Fuente: Frazier, 1974 p. 68)

Figura 2.38 Rotor Kolupaila, aproximadamente 1944.



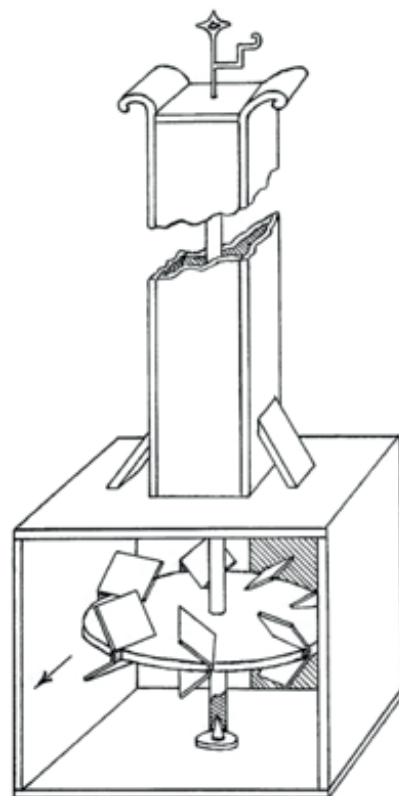
(Fuente: Frazier, 1974 p. 71)

Así mismo, Frazier afirma que la firma alemana Ott produjo un medidor con un rotor especial que registraba la velocidad solamente en la dirección axial a la corriente principal, si se pone en ángulo recto a la corriente no registra; y en cualquier dirección intermedia, Registra la componente de la velocidad en la dirección principal. Es decir que no registra velocidades de flujos secundarios. El rotor de este molinete fue inventado por el Lituano Steponas Kolupaila.

2.9. MOLINETES DE EJE VERTICAL

Frazier indica que algunos medidores no tuvieron éxito pero sí merecen alguna mención. Tal es el caso de un medidor de corriente muy peculiar, su forma y estructura se pueden ver en la Figura 2.39. Se puede considerar como uno de los precursores de los molinetes de eje vertical.

Figura 2.39 Medidor Toloti, 1823.



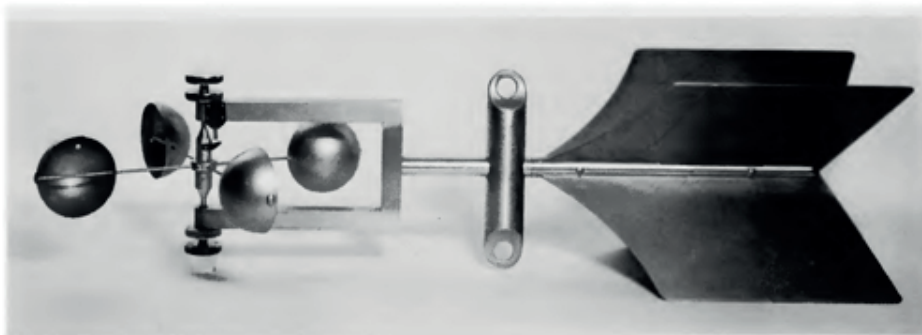
(Fuente: Frazier, 1974 p. 72)

Frazier también explica que el primer molinete con el que se inicia la tendencia de los actuales molinetes de eje vertical, fue el molinete inventado en 1868 por Daniel Farrand Henry (1833-1907) del Departamento de Lagos de los Estados Unidos, las copas las tomó de un anemómetro y contaba con registrador eléctrico.

Siguiendo con el texto de Frazier, éste indica que en 1874 el General Theodore G. Ellis, propuso un molinete más ligero que el de Henry y además le modificó las copas (Figura 2.41).

En el libro de Frazier, se pueden observar que algunos medidores, o molinetes, tenían formas peculiares. Por ejemplo el molinete propuesto por Edwin S. Nettleton, tenía un diseño especial para resistir los sólidos suspendidos y la maleza acuática (Figura 2.41a). Este medidor se diseñó en 1883. También se realizó una modificación al molinete de Nettleton, consistente en adicionar una cámara para proteger los engranes; a este medidor se le llamó "Bailey" (Figura 2.41 b).

Figura 2.40 Molinete de eje vertical, copas y registro eléctrico de Daniel Farrand Henry, 1868.



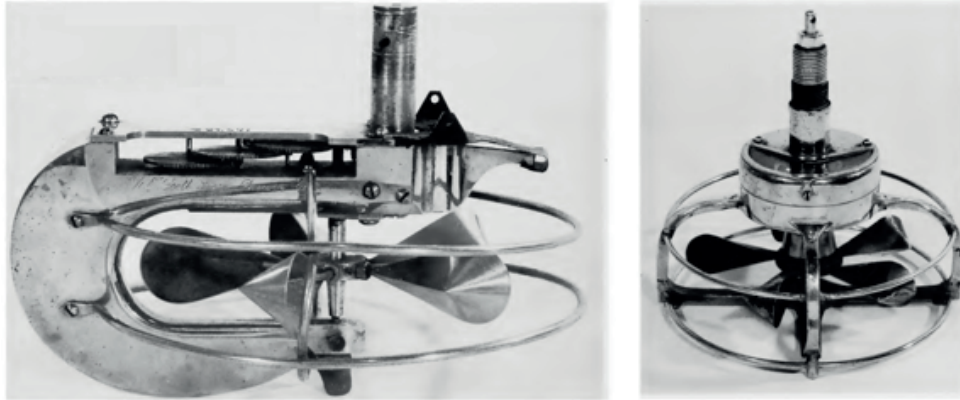
(Fuente: Frazier, 1974 p. 73)

Figura 2.41 Molinete Ellis, 1874.



(Fuente: Frazier, 1974 p. 75)

Figura 2.42 Molinetes Nettleton (a), 1883, y "Bailey" (b), 1889.



(Fuente: Frazier, 1974 p. 76, 77)

El siguiente modelo de molinete surgió en 1882 de la inventiva del matemático e ingeniero William Gunn Price (1853-1928) y el nombre de su modelo persiste aún en la actualidad. Dado que como, dice Frazier "a pesar de que se han realizado diversas modificaciones, el nombre persiste".

Para Frazier una anotación importante para la historia del molinete, es el hecho de que en enero de 1885 William Gunn Price contactó a la empresa W. & L. E. Gurley asentada en Troy, New York, para que construyera para el gobierno, molinetes basados en los diseños de Price. El nom-

bre "Gurley" también prevalece en los molinetes actuales.

Frazier opina que el ingeniero Price fue la principal autoridad en su tiempo en lo que respecta a la medición de corrientes. En este contexto, en 1895 Price diseñó un molinete muy pequeño y ligero al que denominó "acústico" por la manera de conducir el sonido desde la cámara hasta el oído del operador. Los giros del rotor se transmitían a un mecanismo que producía un sonido cada 10 giros y ese sonido se transmitía por el interior hueco de las barras de soporte.

Figura 2.43 Molinete Price "acústico", 1895.

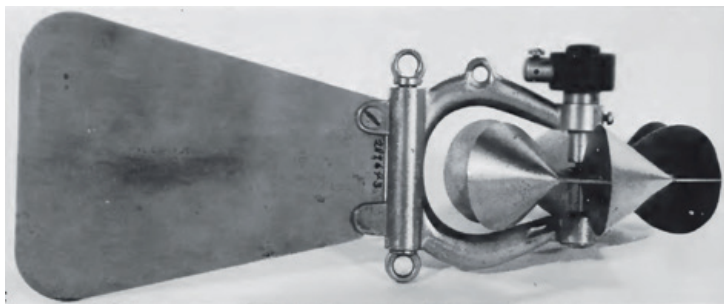


(Fuente: Frazier, 1974 p. 82)

Dada la cantidad de aforos realizados en los Estados Unidos, era necesario contar con el molinete más práctico posible. Dicha labor fue encargada a Edwin Geary Paul quien basado en el diseño del molinete de Price, en 1892 presentó un molinete más pequeño y ligero al que le eliminó el alerón horizontal del timón (Figura 2.45). La fábrica Gurley también manufacturó este molinete. En el libro de Frazier se pueden apreciar unas instalaciones de calibración de molinetes.

El molinete de Paul se volvió muy usual dada su ligereza y la simplicidad para armarlo. Frazier aclara que Paul diseñó su dispositivo para sostenerse con un cable pero en ocasiones se requería que estuviese soportado por una barra rígida, por lo que se le hicieron algunas pequeñas modificaciones para que pudiera usarse tanto en cable como en barra.

Figura 2.44 Molinete pequeño de Edwin Geary Paul, 1892; e instalaciones de calibración.



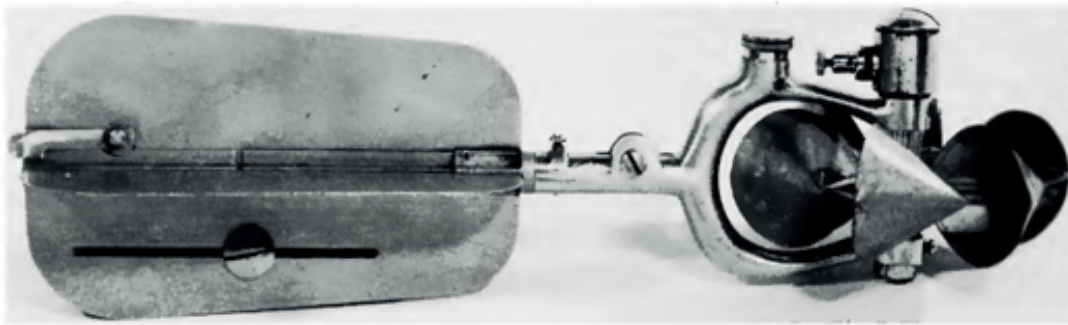
(Fuente: Frazier, 1974 p. 86)



En 1908 salió el primer molinete comercial (antes había uno experimental) en tener la alternativa de registrar un sonido cuando el rotor daba cinco giros, de esta manera cuando el rotor gira muy rápido es más fácil para el operador contar el número

de giros. Además de lo anterior, Frazier muestra en la Figura 2.46, la adición de un contrapeso móvil al timón para mantener en equilibrio horizontal al molinete.

Figura 2.45 Primer molinete comercial Price "penta", 1912.



(Fuente: Frazier, 1974 p. 87)

3

DESCRIPCIÓN DEL MOLINETE ACTUAL

Tradicionalmente se han mencionado los componentes de un molinete sin describir la función de cada pieza y sin considerar que, en realidad, lo que se llama “molinete” es un conjunto o sistema de medición. A continuación se presentan dos diferentes maneras de describir un molinete. Primeramente se hace referencia a lo encontrado en la literatura y en seguida se hace la propuesta de considerar al molinete como un conjunto de medición.

Como ya se indicó se tienen dos tipos principales de molinetes: (a) el molinete de eje vertical o de copas, compuesto de un eje central y vertical alrededor del cual van unidos los rotores o copas; y (b) el molinete de eje horizontal o hélice, compuesto de un eje central y horizontal alrededor

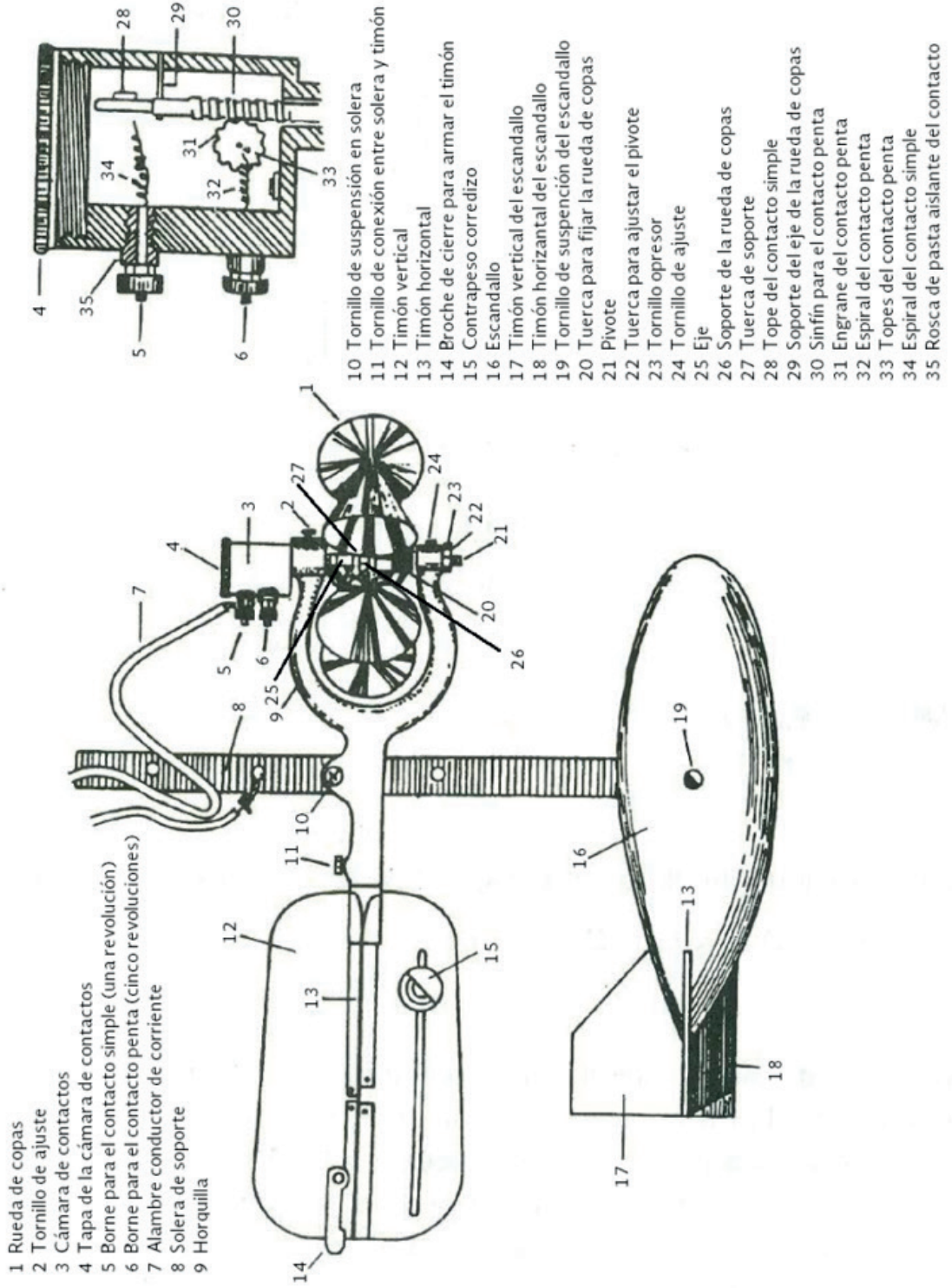
del cual van unidos los álabes curvados o hélice.

3.1. COMPONENTES DE UN MOLINETE: ENFOQUE CONVENCIONAL

Herrera (1997), determina las partes de un molinete considerando el caso de aforo colgando el molinete de un cable (Figura 3.1); en tal circunstancia refiere un total de 35 componentes. Sin embargo, la calidad del esquema en la fuente original no permite distinguir con claridad, las diferentes partes del centro del molinete.

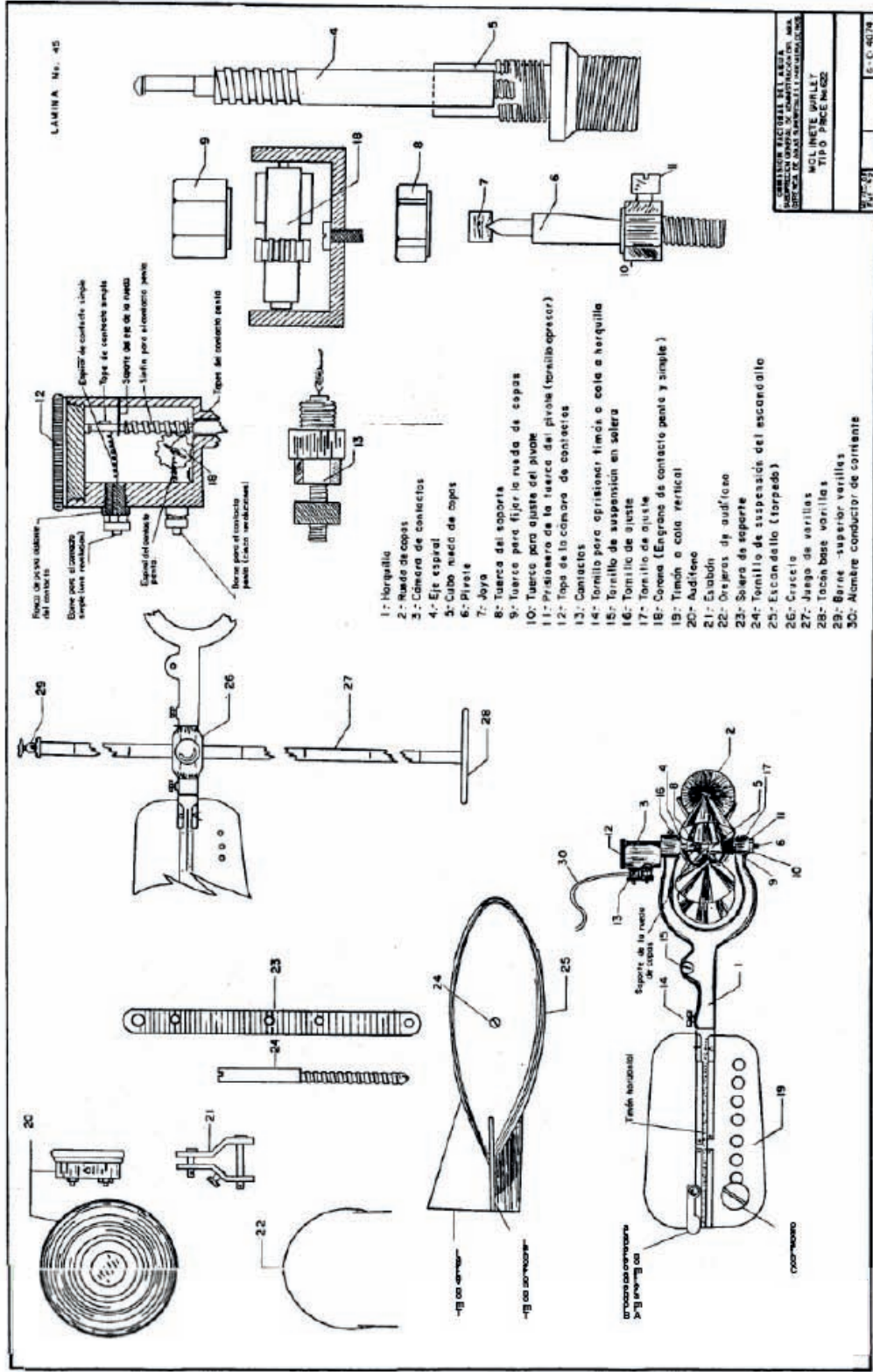
Por otro lado, la Comisión Nacional del Agua publicó en 1993 un “Instructivo de aforo” (Devesa, 1993) en el que se mencionan las partes de un molinete considerando dos circunstancias: cuando se cuelga de un cable y cuando se coloca en una barra rígida; en tales circunstancias se enlistan 30 partes, incluyendo entre éstas a los audífonos (Figura 3.2).

Figura 3.1 Partes de un molinete (35 componentes)



(Fuente: Herrera, 1997 p. 7)

Figura 3.2. Partes de un molinete (30 componentes)



(Fuente: Devesa, 1993, p. 125)

3.2. COMPONENTES DE UN MOLINETE: ENFOQUE COMO CONJUNTO DE MEDICIÓN⁴

Para describir con mayor claridad al molinete, conviene, primeramente considerarlo como un conjunto de medición. Uno de los motivos para hacerlo así es el hecho muy particular de que actualmente lo que se llama “molinete” no tiene ningún componente que sea propiamente eso. El nombre deviene de hace mucho tiempo (probablemente 1780) cuando el rotor era una rueda de paletas parecida a un molino hidráulico. La otra razón para cambiar el enfoque de descripción, es que un molinete tiene varios accesorios que pueden variar en función de la forma de aforar:

Por lo tanto, en función de la conformación del molinete y de la función de cada uno de los accesorios, se puede considerar que el molinete tiene cuatro subconjuntos:

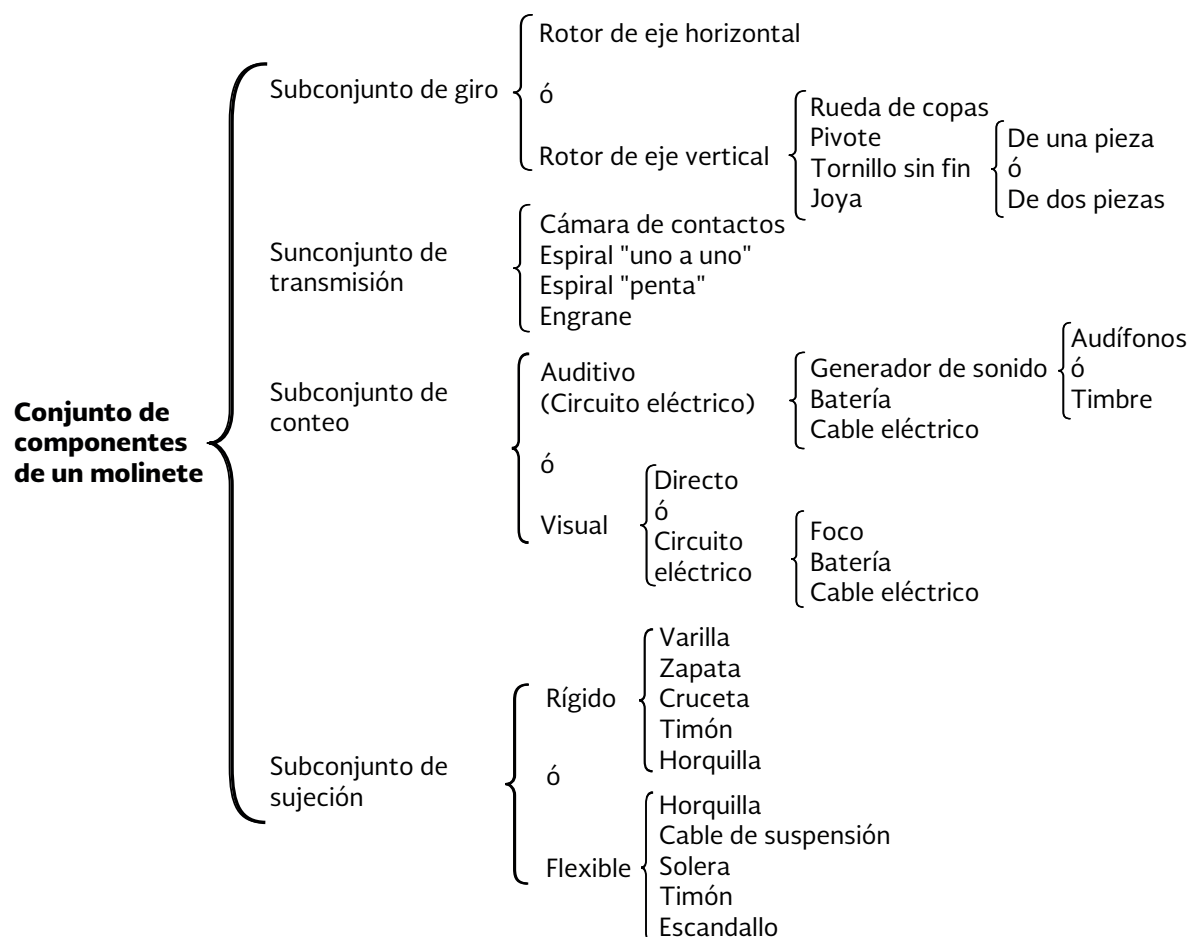
- a) Giro
- b) Transmisión
- c) Conteo
- d) Sujeción

El subconjunto de giro está conformado por las piezas que giran al recibir el empuje del agua. El subconjunto de transmisión son los accesorios por medio de los cuales se transmite el giro al subconjunto de conteo, y dicho subconjunto de conteo está conformado por los componentes cuya función es hacer posible el conteo y registro de los giros. El subconjunto de sujeción es el grupo de elementos en los que se montan los otros subconjuntos, se incluye a las piezas que sirven para colocar el molinete en el agua.

Cada subconjunto está compuesto por cierto número de componentes que cumplen una labor determinada para el funcionamiento general del molinete. Algunos componentes son opcionales o alternos. Por ejemplo, el rotor puede ser de eje vertical o de eje horizontal, la sujeción del medidor puede realizarse con cable o con varillas, y para el conteo de los giros se puede utilizar un sonido o se puede hacer visualmente. En seguida se presenta, un esquema de los componentes básicos y alternos del conjunto de medición o “molinete” (Figura 3.3).

4 Se agradece a Franco Pellegrini Martínez, técnico del área de molinetes, su valioso apoyo para la conformación del contenido de este subcapítulo..

Figura 3.3 Componentes de un molinete: enfoque como conjunto de medición



3.2.1. Subconjunto de giro

Como se observa en el esquema, el subconjunto de giro puede ser diferente si se trata de un rotor de eje horizontal o de un rotor de eje vertical. También puede notarse que solo se presenta la descripción del rotor de eje vertical. Ello responde a que dicho tipo de rotor es el más usado en el aforo de ríos.

El rotor de eje vertical, se compone de la rueda de copas, el pivote, el tornillo sin fin y la joya. En este orden se presentará cada pieza.

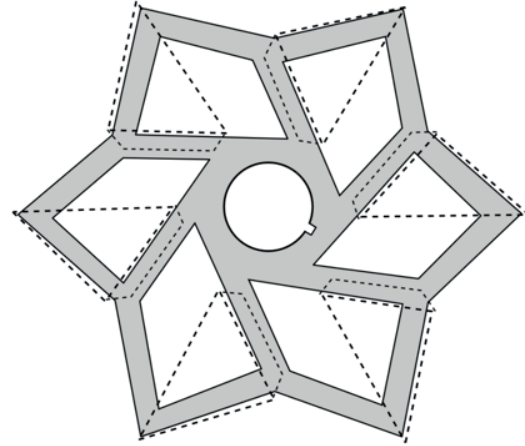
La rueda de copas es un arreglo de seis piezas cónicas huecas, a las que comúnmente se les llama precisamente "copas" (Figura 3.4), y están unidas entre sí por una placa. Esta placa tiene una forma

de estrella con un orificio central que tiene una pequeña “muesca” para acoplarse al tornillo sin fin. En la Figura 3.5 se muestra la forma de estrella de la placa, la disposición de las copas se presenta con una línea punteada. La unión de las copas con la placa, se hace en ocasiones con soldadura y otras veces con unos pequeños remaches. Se puede considerar a la rueda de copas como el elemento primario ya que las copas reciben el empuje del agua y giran por esta razón. Recuérdese que el giro de la rueda de copas es proporcional a la velocidad del agua, así que puede considerarse a este componente como el elemento sustantivo de todo el conjunto.

Figura 3.4 Rueda de copas



Figura 3.5 Forma de la placa donde se montan las copas



El siguiente elemento es el pivote. Se trata de una barra cilíndrica puntiaguda en un extremo y rosca en el otro, y acompañada de una tuerca (Figura 3.6). El pivote se coloca en la horquilla en el cilindro inferior y cumple la importante función de servir como soporte y eje de giro, de la rueda de copas. La tuerca es también muy importante ya que con ella se controla el libre giro de la rueda de copas. Se recomienda que una rueda de copas dure girando más de un minuto con un empujón moderado. Si no se logra esto, se aprieta la rosca del pivote y se despega un poco de la joya, hasta lograr el giro de la rueda por más de un minuto.

Figura 3.6 Pivote con su tuerca



El siguiente elemento es el tornillo sin fin, su función es la de transmitir el giro de la rueda de copas a la cámara de contactos. Se tienen dos tipos de tornillo sin fin, uno conformado por una sola pieza y otro conformado con dos piezas (Figura 3.7). El tornillo de una pieza tiene las siguientes secciones:

- Punta de contactos
- Rosca gruesa
- Ensanchamiento para unión
- Rosca estándar

La punta de contactos es una sección más delgada que el resto del tornillo, es excéntrica y tiene una sección transversal en forma de gota de agua, esta parte entra en la cámara de contactos y cierra el circuito eléctrico al tocar la espiral. Con esta punta de contactos se hace un conteo “uno a uno”, es decir, cada vuelta de la rueda de copas se registra; pero en ocasiones el giro es rápido y se dificulta realizar el conteo. Para solventar el inconveniente se cierra el circuito con el contador “penta”, haciendo girar un engrane con la rosca gruesa del tornillo sin fin. Al cerrarse el circuito eléctrico se

escucha un “click” en los audífonos cada cinco vueltas de la rueda de copas; este sonido hace posible el conteo de los giros del rotor. El uso de un audífono es la manera más común, pero también se puede usar una chicharra o bien un foco. La explicación de los procesos de transmisión y de de conteo se complementa más adelante, en la descripción de los subconjuntos correspondientes.

El tornillo tiene un ensanchamiento para afianzar la unión del tornillo con la rueda de copas. Finalmente, el tornillo presenta un extremo con rosca estándar izquierda, en dicha rosca se coloca una tuerca exagonal, con esta tuerca se aprisiona la rueda de copas contra el ensanchamiento del tornillo sin fin. A un lado de la tuerca exagonal se tiene una tuerca moleteada que sirve para estabilizar el giro del tornillo.

Figura 3.7 Tornillo sin fin de una pieza



Este extremo roscado es hueco y en su interior se ubica la joya, pieza fundamental para el funcionamiento del molinete (Figura 3.8b). La joya es un pequeño cilindro de acero con un extremo “ahuecado” que embona con el pico del pivote; el tornillo sin fin gira sobre el pivote y la joya es el elemento que resiste el rozamiento.

La otra opción es un tornillo sin fin de dos piezas. En principio es similar al tornillo de una pieza, pero con la diferencia que el ensanchamiento ahora lo conforma una pieza aparte llamada “cubo” (Figura 3.9). Una vez unidas ambas piezas conforman un arreglo exactamente igual al del tornillo de una pieza.

En el interior del cubo se coloca la joya y dado que el cubo es hueco, resulta más sencillo separar la joya cuando se requiere sustituir; para ello se utiliza un martillo de herrero, un punzón y un tornillo de banco (Figura 3.10a). También es más sencillo “rectificar” la joya cuando por el roce con el pivote ésta se ha deformado (Figura 3.10b).

El tornillo sin fin –sin importar si es de una o dos piezas- se une a la rueda de copas embonando en la perforación circular que tiene la placa que une a las copas (Figura 3.11). Como puede verse en la fotografía, el tornillo sin fin tiene un pequeño tope que coincide con una muesca de la placa (Figura 3.12). Ello evita que la rueda de copas resbale sobre el tornillo; de esta manera se asegura que ambas piezas giren igualmente.

Figura 3.8 Tuerca “moletada” y repuestos de joyas



(a)



(b)

Figura 3.9 Tornillo sin fin de dos piezas

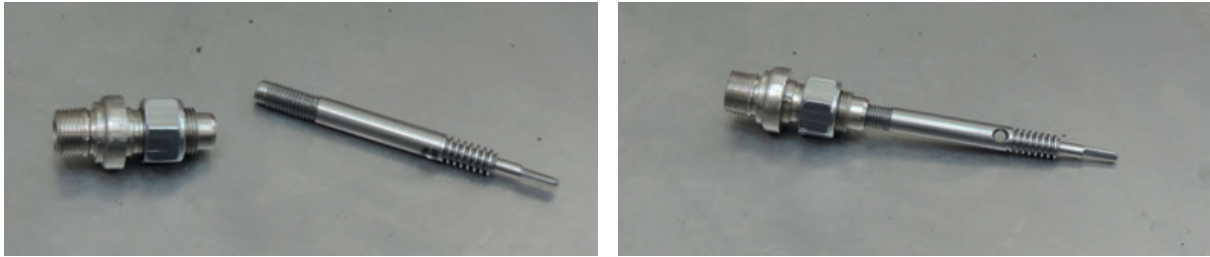


Figura 3.10 Extracción y rectificación de la joya



(a)



(b)

Figura 3.11 Unión del tornillo sin fin con la rueda de copas



Figura 3.12 Tope en el ensanchamiento del tornillo sin fin



3.2.2. Subconjunto de transmisión

El funcionamiento de las piezas del subconjunto de transmisión hace posible que los giros se transformen en señales eléctricas. El subconjunto es el intermediario entre los giros de la rueda de copas y el subconjunto de conteo. Las piezas del subconjunto son la cámara de contactos –pieza principal del subconjunto- la espiral “uno a uno”, la espiral “penta”, y el engrane.

La cámara de contactos es una pieza cilíndrica, hueca y conformada por dos secciones de diferente diámetro y excéntricas entre sí (Figura 3.13).

La sección de menor diámetro se coloca en el cilindro superior de la horquilla y por el centro se cruza el tornillo sin fin para que la punta delgada y la rosca gruesa se alojen en la sección de mayor diámetro. Esto es posible porque la sección de mayor diámetro conforma en su interior un compartimento; en dicho compartimento se encuentra el engrane y por medio de dos perforaciones roscadas se insertan las espirales. Esta parte de la pieza es la que da nombre a la pieza completa, ya que en su interior se producen los contactos eléctricos que cierran el circuito y generan una señal perceptible.

Figura 3.13 Cámara de contactos con los aislantes de las espirales



La cámara de contactos tiene una perforación roscada para sujetar el engrane y una pequeña placa con un orificio para alojar la punta de contactos del tornillo sin fin. En la Figura 3.14 se puede observar en primer plano la pequeña placa que aloja la punta de contactos del tornillo sin fin y en el fondo se aprecia el engrane atornillado a la cámara de contactos.

Se puede decir que la cámara de contactos que se ha presentado, es de tipo mecánico; se menciona este hecho porque existe otro tipo de cámara de contactos: la magnética (Figura 3.15). Dado que es una opción muy poco usada, sólo se menciona pero no se describe a detalle.

Las espirales son piezas cuyo nombre adquieren precisamente de una espiral metálica. Se trata de dos piezas conformadas por una pequeña barra roscada, una tuerca hexagonal, una tuerca “moleteada” y una espiral (Figura 3.16). Una pieza es más grande y por medio de ella se hace el conteo “uno a uno”, que como ya se indicó, es el conteo de cada giro de la rueda de copas; para ello, la espiral hace contacto eléctrico con la punta de contactos del tornillo sin fin, cerrando el circuito eléctrico para registrar cada vuelta. La espiral más pequeña hace contacto con el engrane y con ello se contabiliza una señal por cada 5 vueltas de la rueda de copas; el engrane recibe el giro del tornillo sin fin mediante la rosca gruesa del mismo.

Figura 3.14 Vista del interior de la cámara de contactos



Figura 3.15 Molinete con cámara de contactos de funcionamiento magnético



Ambas espirales se acompañan de una tuerca hexagonal y una tuerca “moletada”, la tuerca hexagonal asegura la espiral al enroscarse y apretarse. La tuerca “moletada” tiene corrugaciones en su exterior para apretarse con la mano; entre ambas tuercas se inserta la conexión de los cables eléctricos del subconjunto de conteo. Las espirales se conectan a la cámara de contactos por medio de dos perforaciones roscadas, ubicadas lateral-

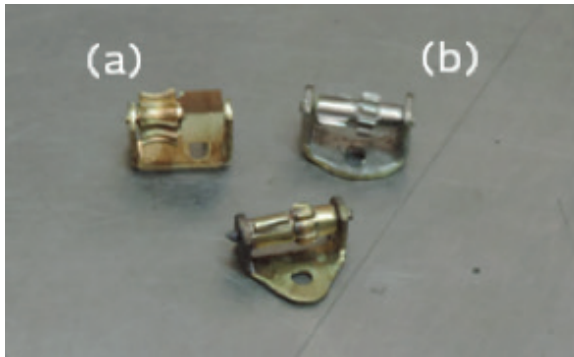
mente en la cámara de contactos; sin embargo, esta conexión no se hace directamente, entre la cámara de contactos y los tornillos de las espirales se coloca una pieza plástica cuya función es aislar eléctricamente los tornillos. Si se colocan las espirales sin esta pieza aislante, se estaría cerrando permanentemente el circuito eléctrico y no sería posible contabilizar las vueltas porque la señal sería continua, y no por intervalos instantáneos.

Figura 3.16 Espirales “uno a uno” y “penta” con los aislantes de contacto y tuercas “moletadas”



El último elemento que conforma al subconjunto de transmisión es el engrane. Esta pieza es una pequeña placa doblada en forma de "u", con una perforación donde se coloca el tornillo de fijación con la cámara de contactos (Figura 3.17).

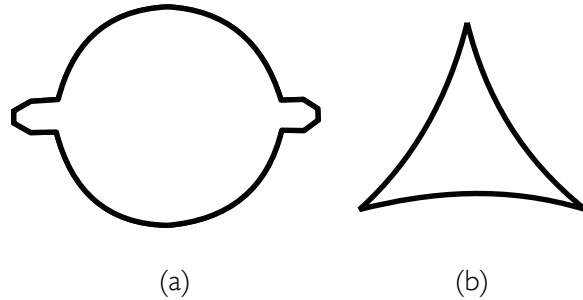
Figura 3.17 Engrane de 16 dientes (a) y engrane de 11 dientes (b)



Las partes laterales funcionan como apoyos giratorios para una barra circular; esta barra es de dos tipos: con engrane de 11 dientes y con engrane de 16 dientes. El engrane de 11 dientes tiene una barra circular con dos "pestañas" opuestas diametralmente (Figura 3.18a), de esta manera, el tornillo sin fin y el engrane dan la misma cantidad de giros, y cuando han girado diez veces, las pes-

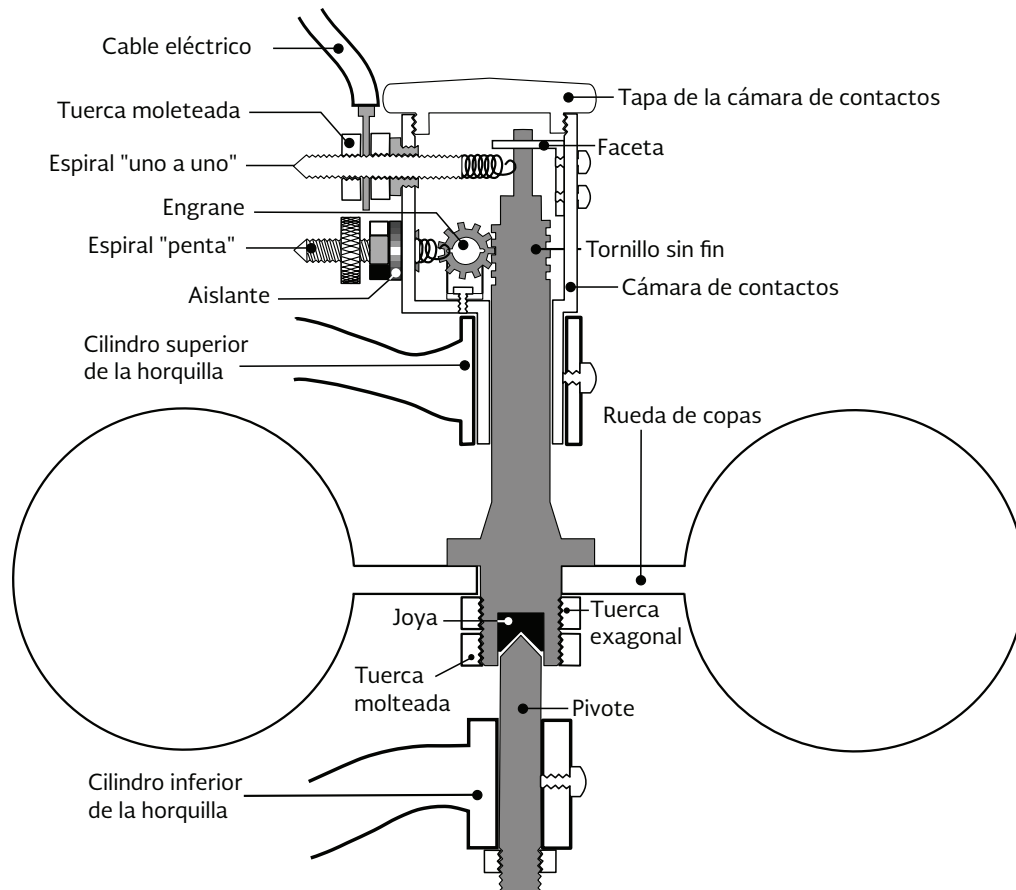
tañas hacen contacto con la espiral en dos ocasiones, lográndose así el registro de una señal, cada 5 vueltas. Por otro lado, si se tiene el engrane con 16 dientes, ahora son tres pestañas de contactos (Figura 3.18b), y de manera similar, si el tornillo sin fin y el engrane dan 15 giros, las pestañas de contactos ahora tocan tres veces la espiral. El número de dientes en cada caso depende del número de espacios entre dientes; es decir se deben tener 11 dientes para tener 10 giros y 16 dientes para contabilizar 15 giros.

Figura 3.18 Pestañas de doble y triple contacto



El acoplamiento de los subconjuntos de giro y transmisión se logra al introducir el tornillo sin fin en la cámara de contactos. En el esquema de la Figura 3.19 se muestran las partes principales de ambos conjuntos.

Figura 3.19 Corte transversal del acoplamiento de los subconjuntos de giro y transmisión



3.2.3. Subconjunto de conteo

El tercer subconjunto que se describe, es el de conteo. Como su nombre lo indica, por medio de los elementos del subconjunto es posible contar el número de giros de la rueda de copas. Se tienen dos opciones para contar los giros: por medio de sonidos o visualmente. En el primer caso, el subconjunto es básicamente un circuito eléctrico con tres componentes: el generador de sonido, que puede ser un par de audífonos o un timbre o cualquier dispositivo que produzca un sonido au-

dible. Se aclara que si se usan unos audífonos, no se requiere un dispositivo adicional para generar el sonido, ya que al cerrarse instantáneamente el circuito, cuando la espiral toca las pestañas del engrane, se produce un pequeño chasquido. El segundo elemento es la batería encargada de suministrar la corriente eléctrica. El generador de sonido y la batería están conectados por medio de un cable eléctrico que es el tercer elemento.

En el caso de contar los giros por medios visuales, se tienen dos opciones: directamente, o por medio

de un circuito eléctrico. El conteo visual directo, solo se puede hacer cuando el molinete está a la vista, ello se logra si el molinete se coloca muy cerca de la superficie y la claridad del agua es suficiente para distinguir las copas. Para ello una de las copas debe estar pintada, generalmente se pintan de color rojo. Cuando el conteo es visual pero por medio de un circuito eléctrico, se tiene también un cable y una batería, pero ahora se tiene un generador de señal visual, como un foco por ejemplo. En la Figura 3.20, se muestra un esquema ilustrativo del subconjunto. Se considera como parte de las opciones del subconjunto a una de las copas que ha sido pintada para permitir el conteo visual directo (Figura 3.21).

Figura 3.20 Esquema ilustrativo del subconjunto de conteo

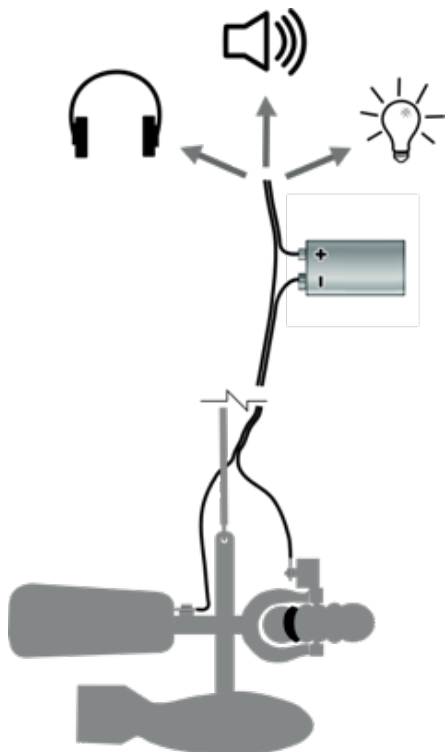


Figura 3.21 Rueda de copas con una de ellas pintada para conteo visual directo



Se presenta al conjunto de conteo, considerando la opción de sujeción flexible del molinete, que en seguida se describe. El concepto importante en este caso, es el circuito eléctrico, y como se observa en la Figura 3.20, el circuito se cierra al conectar una de las terminales del cable en el tornillo de la espiral y la otra terminal en un tornillo ubicado en la parte superior de la horquilla.

Es conveniente aclarar, que el subconjunto de conteo no es suministrado por los vendedores de molinetes, es por ello que se tienen varias soluciones al manejo de la señal para hacerla cuantitativa.

3.2.4. Subconjunto de fijación

En este subconjunto se fijan o soportan los subconjuntos de giro y transmisión; así mismo, algunos

de los componentes sirven para fijar o sumergir al molinete en la corriente y colocarlo a la profundidad deseada. Para la descripción de las piezas del subconjunto se debe mencionar que se tienen dos opciones: una rígida y otra flexible.

En el caso de la sujeción rígida, se tienen cinco piezas: la varilla, la zapata, la cruceta, el timón y la horquilla (Figura 3.22). la primer pieza es una varilla en la que se monta el subconjunto de giro y el timón por medio de una pieza llamada “cruceta”. Esta opción se usa cuando se afora “vadeando”, es decir cuando el aforador se introduce en la corriente. La varilla tiene marcas a cada 10 cm para facilitar la colocación del molinete a la profundidad deseada.

La cruceta es una pieza que une el subconjunto de giro con la varilla y con el timón. Se trata de una pequeña barra de sección circular con una perforación circular al centro donde entra la varilla, otra perforación en un extremo y una sección más delgada. En la perforación se coloca el timón y la sección más delgada entra en la horquilla. La cruceta tiene además dos tornillos para sujetar al timón y a la varilla. El timón se conforma por dos placas de lámina unidas ortogonalmente entre ellas; su función es la de minimizar el cabeceo y los movimientos laterales del subconjunto de giro ante las fluctuaciones de la corriente de agua. La zapata es una placa metálica rectangular que se conecta al extremo inferior de la varilla para servir como apoyo del conjunto cuando se asienta en el fondo del cauce.

Figura 3.22 Conjunto de sujeción, opción rígida

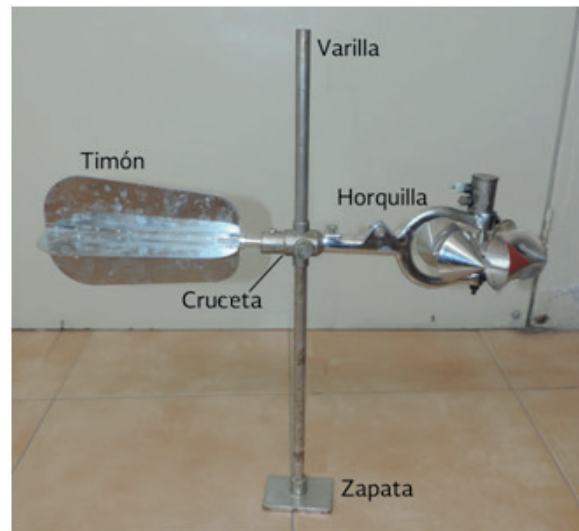
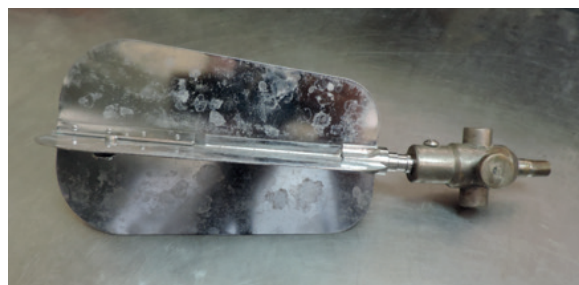


Figura 3.23 Timón y cruceta



La horquilla es una barra recta perforada en el centro y unida a otra barra doblada en forma de “U”, dicha forma permite el libre giro de la rueda de copas. El extremo opuesto a la forma curva de la horquilla se une a la cruceta. Como se observa en la Figura 3.24, la parte recta de la horquilla tiene un tornillo para asegurar la unión con la cruceta. En los extremos de la barra doblada, se tienen un par de cilindros cuyas perforaciones son diferentes, el cilindro inferior tiene una perforación central pequeña, y en ella se coloca el pivote, en un

Figura 3.24 Dos tipos de horquilla



costado tiene una perforación roscada que sirve para asegurar el pivote al cilindro por medio de un tornillo de sujeción. El cilindro superior tiene una perforación más amplia para recibir a la cámara de contactos, también tiene una perforación lateral roscada para asegurar dicha cámara de contactos. En la Figura 3.26 se muestra la horquilla separada del subconjunto.

La segunda opción del subconjunto de sujeción es cuando se usa un cable para suspender el molinete. Como en el caso del subconjunto de conteo, el cable de suspensión no se suministra por el vendedor; ello redundo en que se usen diferentes tipos de cable, por ejemplo, puede ser cable de acero, cuerdas de nylon incluso cables eléctricos que cumplen del doble papel de servir para la suspensión del molinete como para conducir la señal eléctrica para contabilizar los giros.

En este caso, la horquilla es la que une al subconjunto, en ella se coloca la solera, que es una barra rectangular metálica formándose una especie de

Figura 3.25 Solera unida a la horquilla



cruz, en la parte superior se conecta el cable, en la parte inferior el escandallo, en un extremo va el timón y en el extremo contrario el subconjunto de giro. En la Figura 3.27 se muestra la solera unida a la horquilla.

El timón es el mismo que se usa para la opción rígida, pero en la opción flexible se une al subcon-

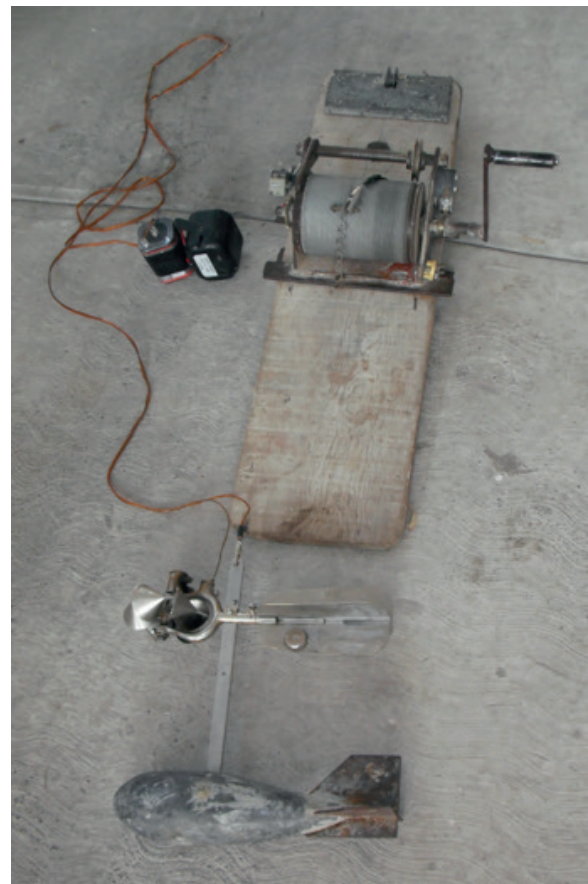
junto por medio de la horquilla en lugar de la cruceta. El último elemento es el escandallo, se coloca en el extremo inferior de la solera y es un elemento cuya función es evitar el arrastre del molinete por el empuje de la corriente de agua. Se trata de una pieza de plomo con forma hidrodinámica que se asemeja a una bala o a un torpedo o en general a un cohete. Tiene además timones o alerones verticales y horizontales que minimizan el cabeceo y los movimientos laterales; ver Figura 3.26.

Figura 3.26 Dos tamaños de escandallo



En la Figura 3.27, se muestran el conjunto completo de molinete con los cuatro subconjuntos. El cable de suspensión es de acero y va montado en un malacate para maniobrar mejor dado que el escandallo tiene un peso de 25 kilos. En este caso, el subconjunto de conteo está resuelto con un generador de sonido llamado “chicharra”.

Figura 3.27 Subconjuntos de un molinete



4 LA CALIBRACIÓN DE LOS MOLINETES

La palabra “calibrar” se deriva, primeramente, de la palabra “calibre”, y según el diccionario de la Real Academia Española, etimológicamente “calibre” viene de la palabra griega *kalópus* que significa simplemente ‘horma’.

Para el caso de la calibración de molinetes, la acepción más adecuada para la acción de calibrar es “ajustar, con la mayor exactitud posible, las indicaciones de un instrumento de medida con respecto a un patrón de referencia” (www.rae.es). De esta manera, la calibración de un molinete es el acto de encontrar a qué velocidad corresponde el número de giros de la rueda de copas.

Primeramente, no sobra mencionar cómo se afora con el molinete. El operador introduce el aparato al agua y lo coloca en una posición determinada previamente. Después de unos momentos, el operador escucha una serie de sonidos que se relacionan con el número de giros que da el rotor al ser movido por la corriente de agua. Una vez que escuchó un número de sonidos durante un tiempo también determinado, consulta una tabla

entrando con el número de giros en el tiempo ya mencionado y encuentra la velocidad del agua que genera ese número de giros. También puede aplicar una ecuación para determinar la velocidad. Tanto la ecuación como la tabla son el producto de la calibración.

4.1. PORQUÉ SE DEBE CALIBRAR UN MOLINETE

Los molinetes se deben calibrar para saber qué velocidad corresponde a un cierto número de giros de la rueda de copas. La calibración es indispensable dado que cada molinete es diferente, cada uno tiene diferente resistencia al giro por el empuje del agua del agua y cada uno se usa de distinta manera. Así que dado el tipo de molinete y el tiempo de uso, se deben calibrar al inicio de su operación y cada cierto tiempo después de su uso normal o después de alguna falla o desperfecto. En el laboratorio de calibración se recomienda calibrar los molinetes cada 6 meses cuando se tiene un uso normal de los mismos. El desajuste de un

medidor sucederá inevitablemente después de un tiempo de uso normal y con mayor razón después de un desperfecto y obviamente cuando sale de su fabricación estará “descalibrado”.

4.2. EL LABORATORIO DE CALIBRACIÓN DE MOLINETES

En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, se tiene un laboratorio de calibración de molinetes. Todos los molinetes que llegan para calibración pasan primero por un lavado y luego por un mantenimiento de cada una de sus partes. Después del proceso de mantenimiento se pasa a calibración.

Figura 4.1 Molinetes recién lavados.



En función del tipo de molinete el mantenimiento, es diferente, por ejemplo, si el molinete es tipo Price. Las piezas consideradas son (Martínez 2017):

- Pivote
- Joya
- Cámara y engranes
- Horquilla
- Copas
- Tornillos y cuerdas
- Espirales y aislantes de los contactos simple y penta
- Timón y solera
- Tornillo sin fin
- Faceta

Figura 4.2 Revisión del giro de la rueda de copas en un molinete “pigmeo”.



En cambio si el molinete es de hélice, solamente se consideran el “reed switch” y los baleros.

4.3. DESCOMPOSTURAS MÁS COMUNES EN MOLINETES

Según el personal del taller de reparación de molinetes, las partes que más se reparan son los elementos de giro y roce; es decir los pivotes, las espirales y las joyas; y en menor grado, las copas, ya que los golpes de objetos flotantes las enchuecan y desoldan.

4.4. EL TANQUE DE CALIBRACIÓN DEL IMTA

Ya se ha dicho que la calibración de un molinete consiste en relacionar un rango de velocidades de la corriente de agua con el número de giros de la rueda de copas del molinete. Para ello se usa un canal en donde el agua está en reposo y lo que se mueve es el molinete. El canal donde el agua permanece en reposo puede tener una trayectoria recta o bien una trayectoria que describe un círculo-

lo. En el primer caso el molinete se desplaza de un extremo a otro del canal pero tiene la desventaja que no puede moverse más. En cambio en el canal de trayectoria circular, el molinete se monta en un brazo giratorio y de esta manera puede desplazarse ininterrumpidamente. Este segundo tipo de canal es el que se tiene en el IMTA.

El tanque de calibración consta de cuatro partes principales: (a) canal de trayectoria circular; (b); brazos giratorios (c) motor y (d) el Sistema de Calibración de Molinetes (SCM).

El canal tiene unos aquietadores que evitan el movimiento del agua por arrastre del paso del molinete y la barra que lo sujeta (Figura 4.3). Los brazos giratorios son el soporte para colocar los molinetes en el agua, dichos brazos son movidos por un motor y el SCM consiste en un detector de la velocidad de giro de los brazos, otro detector del número de giros de la rueda de copas del molinete y un programa de cómputo que controla todo el proceso.

Figura 4.3 Canal de trayectoria circular del IMTA



4.5. EL SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO (SCM)



El SCM opera de manera fundamental de la siguiente forma⁵:

Uno o dos molinetes se colocan en los brazos giratorios, sumergidos en el canal de trayectoria circular. Los molinetes giran a la velocidad designada en el SCM utilizando un variador de frecuencia, generalmente de 12 velocidades en un rango de 0.2 a 2.7 m/s. Los molinetes están alimentados por

un voltaje de 5 V y al girar generan un pulso, que se contabiliza por el sistema en revoluciones por minuto. El sistema SCM utiliza el variador de frecuencia para controlar la velocidad del motor; al finalizar el recorrido en las 12 velocidades, se obtiene la ecuación característica de estos medidores por medio de un algoritmo programado en la computadora central del sistema. Posteriormente se obtiene el reporte impreso con la información de la caracterización (ver Figura 4.4, Figura 4.5 y Figura 4.6). Toda la información se almacena en una base de datos para que en un futuro si es necesario, se pueda consultar.

5 Colaboración del Maestro Javier Martínez Navarro, encargado del laboratorio de calibración de molinetes IMTA.

Figura 4.4 Primer hoja del reporte de calibración.

 <p>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA LABORATORIO DE HIDRÁULICA "ENZO LEVI" SERVICIO DE CARACTERIZACIÓN DE MOLINETES</p>	 <p>SEMARNAT SECRETARÍA DE TERRESTRES AGUAS Y RECURSOS NATURALES</p>	
		<p>Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Morelos CP 62550 Tel/Fax 3 29 36 79, Email: molinetes@tlaloc.imta.mx</p>
<p>DATOS GENERALES:</p>		<p>REPORTE No. <input type="text" value="11125"/></p>
<p>Marca/modelo: <input type="text" value="ROSSBACH"/></p>	<p>Tipo: <input type="text" value="PRICE"/></p>	
<p>Clave: <input type="text" value="HS 3245J"/></p>	<p>Número de serie: <input type="text" value="1127 TPG. 80 s."/></p>	
<p>Propiedad de: <input type="text" value="JAIME PÉREZ"/></p>	<p>Responsable: <input type="text" value="JAIME PÉREZ"/></p>	
<p>Fecha de Prueba: <input type="text" value="2017/08/16"/></p>	<p>Próxima Prueba: <input type="text" value="Seis meses después del 1er. Aforo"/></p>	
<p>MANTENIMIENTO:</p>		
<p>Estado de ingreso: <input type="text" value="SUCIO Y DESAJUSTADO"/></p>		
<p>Pruebas mecánicas: <input type="text" value="GIRO Y EMISION DE PULSOS"/></p>		
<p>Servicios: <input type="text" value="CAMBIO: Tuerca Moleteada, Pivote, Aislantes, Espi. Contac. Simple, Espi. Contac. Penta REPARACION: Joya."/></p>		
<p>PARAMETROS:</p>		
<p>Ecuación actual: $V = mN + b$</p>	<p>Rango de caracterización:</p>	<p>Error medio cuadrático:</p>
<p>m: <input type="text" value="0.01146"/> b: <input type="text" value="0.03910"/></p>	<p><input type="text" value="0.2"/> - <input type="text" value="2.7"/> m/s</p>	<p><input type="text" value="0.00037"/></p>
<p>Temp. del agua: <input type="text" value="21.00"/> °C</p>		
<p>Observaciones: <input type="text" value="El violar las partes selladas pierde su garantía, se recomienda limpieza y lubricación después de cada aforo."/></p>		
<p>Calibración:</p>	<p>Recepción:</p>	<p>Emisión:</p>
<p><input type="text" value="Franco Pellegrini (Esp. Tec.)"/></p>	<p><input type="text" value="Javier Martínez (Esp. en Hca.)"/></p>	<p><input type="text" value="José Alfredo González (Subcoordinador)"/></p>
<p>Fecha: <input type="text" value="16/AGO/17"/></p>	<p>Fecha: <input type="text" value="16/AGO/17"/></p>	<p>Fecha: <input type="text" value="16/AGO/17"/></p>

Este documento es válido únicamente para el molinete cuya identificación está definida en Datos Generales.

Figura 4.5 Segunda hoja del reporte de calibración.



INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
LABORATORIO DE HIDRÁULICA "ENZO LEVI"
SERVICIO DE CARACTERIZACIÓN DE MOLINETES

SEMARNAT



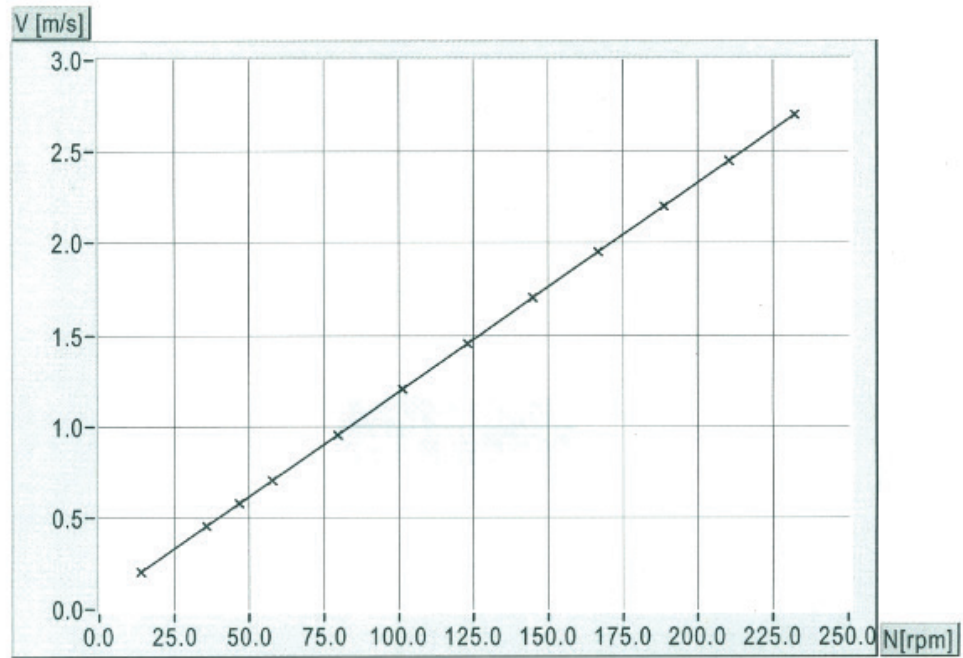
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Morelos
CP 62550 Tel/Fax 3 29 36 79, Email: molinetes@tlaloc.imta.mx

2017/06/

Número de Serie 1127 TPG. 80 s.

12:47:52

GRAFICA DE CARACTERIZACION DEL MOLINETE: HS 3245J




Lecturas del molinete \hat{x} \hat{y} :
Línea ajustada.


Ecuación de la recta: $V = mN + b$
m 0.01146 b 0.03910 e: 0.00037

Responsable: Javier Martínez (Esp. en Hca.)

Figura 4.6 Tercer hoja del reporte de calibración.



INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
LABORATORIO DE HIDRÁULICA "ENZO LEVI"
SERVICIO DE CARACTERIZACIÓN DE MOLINETES



SEMARNAT
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Morelos
CP 62550 Tel/Fax 3 29 36 79, Email: molinetes@taloc.imta.mx

Fecha: 2017/06/22

Número de Serie: 1127 TPG. 80 s.

Ecuación $V = m \cdot N + b$

m (m/rev.): 0.6576
b: 0.0391

Tabla de Velocidades

V = metros/segundo
T = segundos
N=Revoluciones por segundo
R= Número de Revoluciones

Número de reporte: 11125

Clave de Molinete: HS 3245J

TR																									
	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200	250			
40	0.056	0.073	0.091	0.108	0.125	0.211	0.287	0.383	0.469	0.555	0.641	0.727	0.813	0.899	1.071	1.242	1.414	1.586	1.758	2.618	3.477	4.337			
41	0.056	0.073	0.089	0.106	0.123	0.207	0.291	0.375	0.458	0.542	0.626	0.710	0.794	0.878	1.045	1.213	1.381	1.548	1.716	2.555	3.393	4.232			
42	0.055	0.072	0.088	0.105	0.121	0.203	0.285	0.367	0.448	0.530	0.612	0.694	0.776	0.858	1.021	1.185	1.349	1.513	1.678	2.495	3.313	4.132			
43	0.055	0.071	0.087	0.103	0.119	0.199	0.279	0.359	0.439	0.519	0.599	0.679	0.759	0.839	0.999	1.158	1.318	1.478	1.638	2.438	3.237	4.037			
44	0.055	0.070	0.086	0.102	0.117	0.195	0.274	0.352	0.430	0.508	0.586	0.664	0.742	0.820	0.977	1.133	1.289	1.446	1.602	2.383	3.165	3.946			
45	0.054	0.070	0.085	0.100	0.115	0.192	0.268	0.345	0.421	0.497	0.574	0.650	0.727	0.803	0.958	1.109	1.261	1.414	1.567	2.331	3.095	3.859			
46	0.054	0.069	0.084	0.099	0.114	0.189	0.263	0.338	0.413	0.488	0.562	0.637	0.712	0.786	0.936	1.085	1.235	1.384	1.534	2.281	3.029	3.776			
47	0.054	0.068	0.083	0.098	0.112	0.185	0.259	0.332	0.405	0.478	0.551	0.624	0.697	0.771	0.917	1.063	1.209	1.356	1.502	2.234	2.965	3.697			
48	0.053	0.068	0.082	0.096	0.111	0.182	0.254	0.326	0.397	0.469	0.540	0.612	0.684	0.755	0.899	1.042	1.185	1.328	1.472	2.188	2.904	3.620			
49	0.053	0.067	0.081	0.095	0.109	0.179	0.250	0.320	0.390	0.460	0.530	0.600	0.671	0.741	0.881	1.021	1.162	1.302	1.442	2.144	2.846	3.547			
50	0.053	0.067	0.080	0.094	0.108	0.177	0.245	0.314	0.383	0.452	0.520	0.589	0.658	0.727	0.864	1.002	1.139	1.277	1.414	2.102	2.789	3.477			
51	0.053	0.066	0.080	0.093	0.107	0.174	0.241	0.309	0.376	0.444	0.511	0.578	0.646	0.713	0.848	0.983	1.118	1.253	1.387	2.061	2.736	3.410			
52	0.052	0.066	0.079	0.092	0.105	0.171	0.237	0.304	0.370	0.436	0.502	0.568	0.634	0.700	0.832	0.965	1.097	1.229	1.361	2.023	2.684	3.345			
53	0.052	0.065	0.078	0.091	0.104	0.169	0.234	0.299	0.363	0.428	0.493	0.558	0.623	0.688	0.818	0.947	1.077	1.207	1.336	1.985	2.634	3.282			
54	0.052	0.065	0.077	0.090	0.103	0.166	0.230	0.294	0.357	0.421	0.485	0.548	0.612	0.676	0.803	0.930	1.058	1.185	1.312	1.949	2.586	3.222			
55	0.052	0.064	0.077	0.089	0.102	0.164	0.227	0.289	0.352	0.414	0.477	0.539	0.602	0.664	0.789	0.914	1.039	1.164	1.289	1.914	2.539	3.165			
56	0.051	0.064	0.076	0.088	0.100	0.162	0.223	0.285	0.346	0.407	0.469	0.530	0.592	0.653	0.776	0.899	1.021	1.144	1.267	1.881	2.465	3.109			
57	0.051	0.063	0.075	0.087	0.099	0.160	0.220	0.280	0.341	0.401	0.461	0.522	0.582	0.642	0.763	0.884	1.004	1.125	1.245	1.849	2.452	3.055			
58	0.051	0.063	0.075	0.087	0.099	0.158	0.217	0.276	0.335	0.395	0.454	0.513	0.573	0.632	0.750	0.869	0.988	1.106	1.225	1.817	2.410	3.003			
59	0.051	0.062	0.074	0.086	0.097	0.156	0.214	0.272	0.330	0.389	0.447	0.505	0.564	0.622	0.738	0.855	0.971	1.088	1.205	1.787	2.370	2.953			
60	0.051	0.062	0.073	0.085	0.096	0.154	0.211	0.268	0.326	0.383	0.440	0.497	0.555	0.612	0.727	0.841	0.956	1.071	1.185	1.758	2.331	2.904			
61	0.050	0.062	0.073	0.084	0.095	0.152	0.208	0.265	0.321	0.377	0.434	0.490	0.546	0.603	0.715	0.828	0.941	1.054	1.166	1.730	2.264	2.857			
62	0.050	0.061	0.072	0.083	0.095	0.150	0.205	0.261	0.316	0.372	0.427	0.483	0.538	0.594	0.705	0.815	0.926	1.037	1.148	1.703	2.257	2.812			
63	0.050	0.061	0.072	0.083	0.094	0.148	0.203	0.257	0.312	0.367	0.421	0.476	0.530	0.585	0.694	0.803	0.912	1.021	1.131	1.676	2.222	2.768			
64	0.050	0.061	0.071	0.082	0.093	0.147	0.200	0.254	0.308	0.361	0.415	0.469	0.523	0.576	0.684	0.791	0.899	1.006	1.113	1.651	2.188	2.725			
65	0.050	0.060	0.071	0.081	0.092	0.145	0.198	0.251	0.304	0.356	0.409	0.462	0.515	0.568	0.674	0.780	0.885	0.991	1.097	1.626	2.155	2.684			
66	0.050	0.060	0.070	0.081	0.091	0.143	0.195	0.247	0.300	0.352	0.404	0.456	0.508	0.560	0.664	0.768	0.873	0.977	1.081	1.602	2.123	2.644			
67	0.049	0.060	0.070	0.080	0.090	0.142	0.193	0.244	0.296	0.347	0.398	0.450	0.501	0.552	0.655	0.757	0.860	0.963	1.065	1.579	2.052	2.605			
68	0.049	0.059	0.069	0.080	0.090	0.140	0.191	0.241	0.292	0.342	0.393	0.444	0.494	0.545	0.646	0.747	0.848	0.949	1.050	1.556	2.061	2.567			
69	0.049	0.059	0.069	0.079	0.089	0.139	0.189	0.238	0.288	0.338	0.389	0.438	0.488	0.537	0.637	0.737	0.836	0.936	1.036	1.534	2.032	2.530			
70	0.049	0.059	0.069	0.078	0.088	0.137	0.186	0.236	0.285	0.334	0.383	0.432	0.481	0.530	0.628	0.727	0.825	0.923	1.021	1.513	2.004	2.495			

Responsable: Javier Martínez (Esp. en Hca.)

FO.C4.3.09.0 3 / 4
Página:

4.6. CARACTERIZACIÓN COMO SINÓNIMO DE CALIBRACIÓN

La definición de calibración, relaciona un instrumento de medida con un patrón de referencia. Debe hacerse la aclaración que desde la perspectiva de una metrología rigurosa, la calibración que se realiza a los molinetes no se compara con un patrón de referencia. En su lugar, lo que se realiza es la comparación de los giros del molinete con la

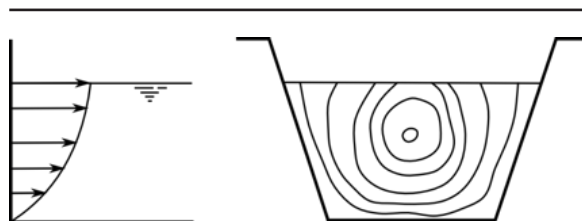
velocidad conocida en los brazos donde se coloca. Así, la velocidad de los brazos giratorios funge como el patrón de referencia sin serlo de manera ortodoxa. Es por ello que el personal del laboratorio prefiere utilizar la palabra “caracterización” aclarando que se determinan las características de la ecuación resultante de la calibración. Sin embargo, en este libro se prefiere usar la palabra “calibración” porque es el término más común en el ámbito de la hidrometría en ríos y canales.

5

IMPORTANCIA DE LA VELOCIDAD MEDIA EN AFORO CON MOLINETE

Se supone que la velocidad del agua en los conductos tiene una distribución como la presentada a continuación.

Figura 5.1 Distribución de velocidades en un canal recto



En la vertical

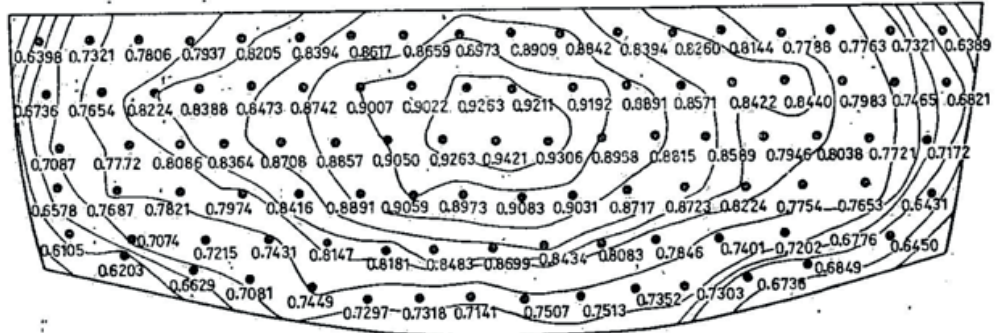
En una sección transversal

Pero en realidad se tienen otros perfiles o curvas isótacas (curvas de igual velocidad) (Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4) Pero, ¿por qué no se presentan perfiles de velocidades con figuras conocidas? La respuesta es por la presencia de elementos que provocan perturbaciones en el flujo. La presencia de tales elementos provoca que el flujo presente velocidades que no son perpendiculares a la sección

transversal y que la superficie de los perfiles de las velocidades es irregular y ello dificulta el cálculo de una "velocidad media". Estas dificultades disminuyen aunque no desaparecen en un tramo de río que no tenga ningún elemento que lo perturbe nuevamente. La recomendación en estos casos es contar con un tramo recto del río sin cambios en su sección transversal, ni compuertas, ni curvas de una longitud igual o mayor a 10 veces el ancho de la superficie libre del río, para gasto máximo en el mismo.

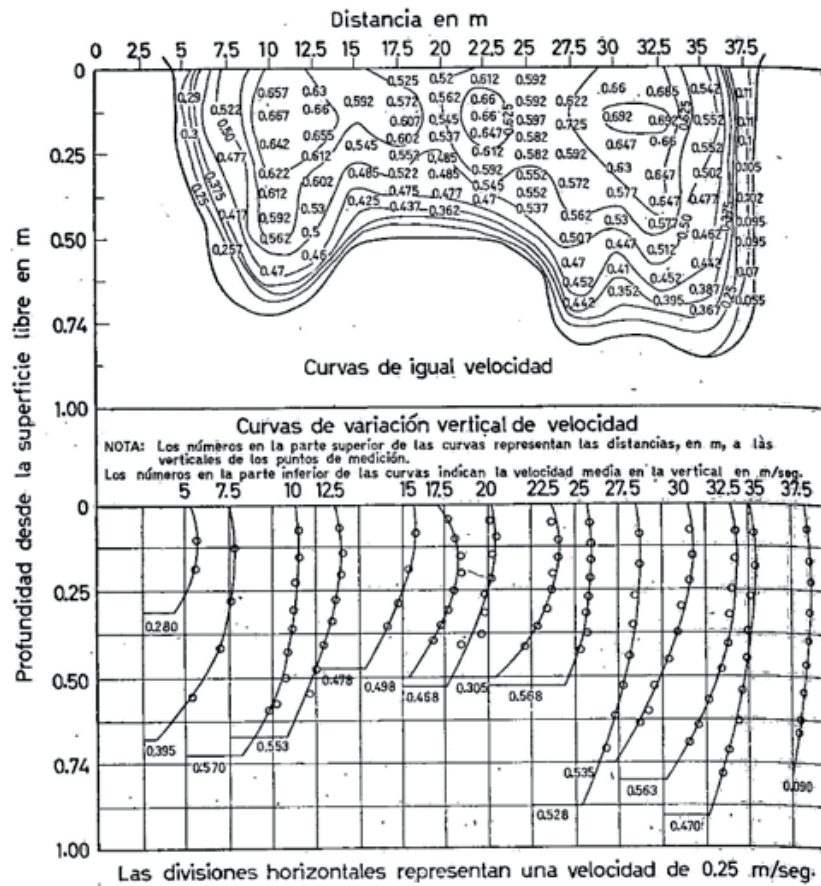
Al respecto de la distribución de velocidades en flujos a superficie libre, El Departamento Geológico de los EE.UU. construyó muchas curvas de velocidades para un sinnúmero de corrientes. Ejemplos de dichas curvas se presentan en la Figura 5.3. Para la cuestión de la medición de velocidades, y gastos, se tienen dos problemas: (a) el perfil no es una línea recta y (b) al ser una línea curva o parecida ¿cuál velocidad se ocupa?

Figura 5.2 Distribución de velocidades, en m/s, en el conducto Subury.



(Fuente: King, 1993 p. 419)

Figura 5.3 Distribución de las velocidades de un canal abierto.



(Fuente: King, 1993 pag. 420)

Figura 5.4 Perfil en planta de las velocidades en el canal "Las Estacas" en el estado de Morelos, medidas con un perfilador doppler montado en un flotador.

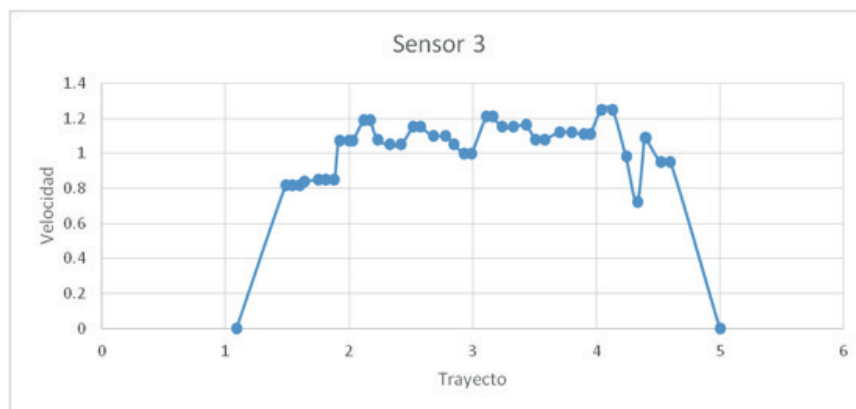
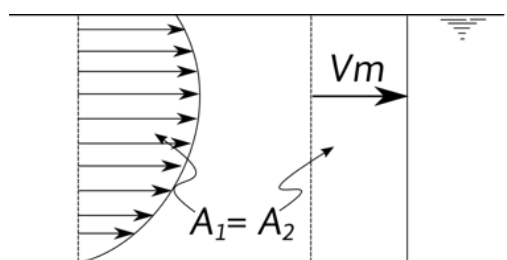


Figura 5.5 Concepto de "Velocidad media".

5.1. EL CONCEPTO DE VELOCIDAD MEDIA

Todo lo anterior puede solucionarse, en un grado aceptable, pero no total, por medio del concepto de "velocidad media". Este concepto es sencillo de explicar, se puede decir que es una velocidad representativa del flujo, pero no es fácil de conocer en la práctica. La velocidad media (V_m) es la magnitud de la velocidad en la dirección del flujo que resultaría si se convirtiera el área definida por todas las magnitudes de la velocidad, ver Figura 5.5a, en un rectángulo con una altura igual a la profundidad del canal y un ancho de V_m (Figura 5.5b) de tal manera que las áreas 1 y 2 sean de la misma magnitud.



5.2. EL MÉTODO DE ÁREA VELOCIDAD Y EL MOLINETE

Al método usado para aforar con molinete se le llama "área velocidad", ello porque la fórmula usada para calcular el gasto es la multiplicación del área por la velocidad, ecuación (5.2); es decir $Q=AV$; donde Q , es el gasto; A , es el área de la sección transversal y V es la velocidad. Debe aclararse que el área y la velocidad deben ser el área hidráulica.

lica y la velocidad media, respectivamente. Así mismo, debe recordarse que la ecuación anterior se dedujo suponiendo que el agua avanza como un bloque de figura prismática regular (Cuadro 1.2), como la mostrada en la Figura 5.6a.

Sin embargo, como se indicó anteriormente, el agua realmente no avanza como un bloque regular, más bien lo hace como una figura parecida a la mostrada en la Figura 5.6b. Es por ello que para aforar con molinete, se recurre a dividir la sección transversal del cauce en dovelas como las mostradas en la Figura 5.6c y de esta manera ya se tienen figuras prismáticas regulares que permiten usar la ecuación.

Por otro lado, para saber a qué profundidad se encuentra la velocidad media de cada dovela se recurre a lo dicho por King (1993):

1. La velocidad media en una vertical, dentro de un error máximo del 3% y un error medio de 1%, se presenta a 0.6 de la profundidad.
2. La velocidad media en una vertical, dentro de un error máximo de 1% y un error

medio nulo, es la media aritmética de las velocidades de 0.2 y 0.8 de la profundidad, respectivamente.

Es por ello que para aforar con molinete se forman las dovelas y se coloca el molinete a seis décimos de la profundidad del agua o bien, a 0.2 y 0.8 del tirante a partir de la superficie del agua y la velocidad media en la dovela será el promedio de los dos valores. Se debe mencionar que en la práctica es muy raro que se use la segunda opción.

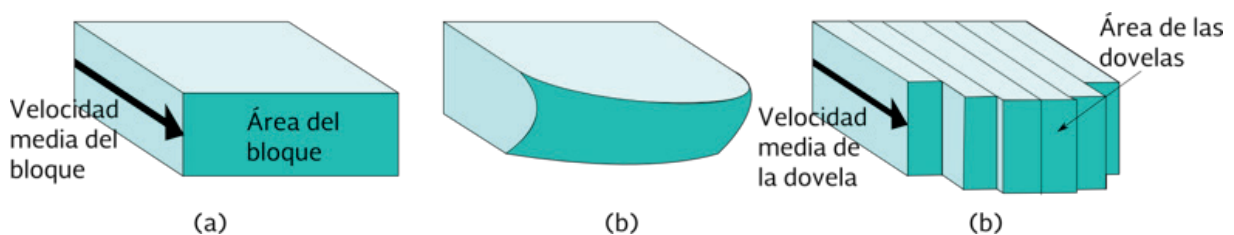
En vista de lo anterior, al aforar con molinete lo que se hace es estimar el gasto en cada bloque y el gasto total es la suma de los gastos en cada uno.

Para reforzar lo anterior, se recurre a Kennedy et al (1992) quienes indican que el gasto total se calcula como sigue:

$$Q = \sum (V_n a_n) \quad (5.1)$$

Para calcular la sumatoria, se deben multiplicar las áreas de cada franja por la velocidad media en la misma franja, obteniéndose de esta manera el gasto parcial; es decir:

Figura 5.6 Justificación del uso de dovelas en la medición con molinete.



$$q_n = V_n a_n \quad (5.2)$$

Las variables medidas y calculadas se definen como sigue:

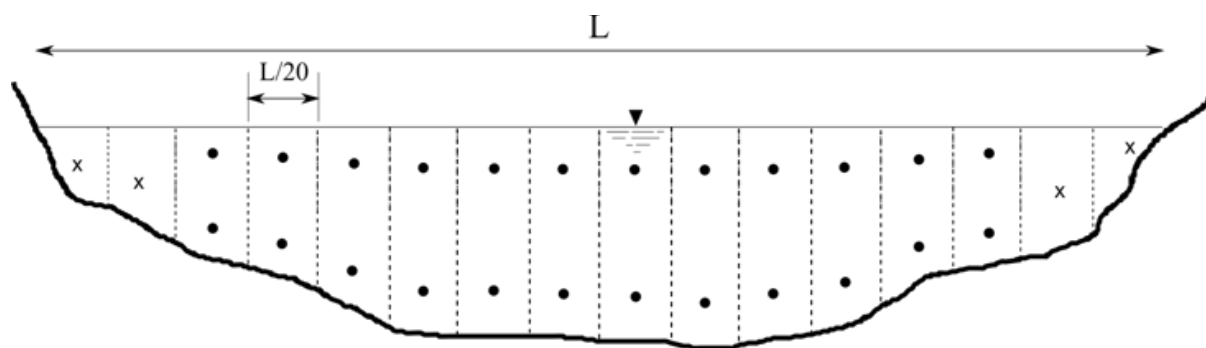
- q = gasto parcial
- Q = Gasto total
- V = Velocidad media asociada a cada franja

- a = Área parcial de cada franja
- n = Número de franjas

Para aforar según lo mencionado, se utiliza lo que se llama "Libreta de aforos". En ella se va anotando diversa información que sirve para, allí mismo, realizar cálculos y estimar el gasto en la corriente; además de otro tipo de información. En lo que sigue se cita lo indicado por Kennedy et al (1993) para llenar la libreta de aforo.

Igualmente, Kennedy et al (1992) recomiendan los siguientes anchos de las franjas, en función del ancho total de la corriente (Cuadro 5.1).

Figura 5.7 Seccionamiento para el aforo con procedimiento de 2 puntos, en secciones transversales intermedias, seis décimos en las laterales y subsuperficial en las extremas



Cuadro 5.1 Ancho de las franjas en función del ancho de la corriente

Ancho de la corriente (m)	Ancho de la franja (m)
Hasta 1.2	0.2 - 0.3
1.2 - 5	0.3 - 0.5
5 - 10	0.5 - 1.0
10 - 50	1.0 - 5.0
50 - 100	5.0 - 10.0
Más de 100	10.0 - 20.0

Figura 5.8 Libreta de aforo, llenado de la columna 1.

SONDEOS					MOLINETE			VELOCIDAD		SECCION			OBSERVACIONES RELATIVAS A VARIACIONES U OBSTRUCCIONES EN EL PUNTO, ANCHURAS EN LOS INJEROS Y METODOS USADOS. DESGLOSE DEL TIPO Y MASA DEL CABLE, CONDICIONES DEL FONDO DE CAUCE, PESO Y TIPO DEL ESCANDALLO, METODO DE SUSPENSION, ETC.
DISTANCIA DEL PUNTO INICIAL	PROFUNDIDAD	Método	PROFUNDIDAD DE LA OBSERVACION	NUMERO DE REVOLUCIONES	TIEMPO EN SEGUNDOS	REVOLUCIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEFICIENTE	MEDIA DEL TRAMO	ANCHURA	PROFUNDIDAD MEDIA	AREA	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
m	m		m				m/s						15

Columna 1: distancia (m) del origen al punto límite o punto de aforo. Se considera origen el punto donde se inicia el puente o cable, pudiendo ser de cualquier orilla.

ESTACION _____ CORRIENTE _____ CUENCA _____		Servicio hidrométrico FECHA: _____ MOLINETE: _____ MARCA, TIPO Y NUMERO OBSERVADOR: _____ PRINCIPIO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____ TERMINO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____		AFORO NUMERO _____ PROMEDIO LECT. ESC. _____ m AREA TOTAL _____ m ² VELOCIDAD MEDIA _____ m/s GASTO TOTAL _____ m ³ /s	
---	--	--	--	--	--

Figura 5.9 Libreta de aforo, llenado de la columna 2.

SONDEOS					MOLINETE			VELOCIDAD			SECCIÓN			OBSERVACIONES					
DISTAN- CIA DEL PUNTO INICIAL	PROFUN- DIDAD	PROFUN- DIDAD DE LA OBSERVACIÓN	NÚMERO DE REVOLU- CIONES	TIEMPO EN SEGUN- DOS	REVOLU- CIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEFI- CIENTE	MEDIA DEL TRAMO	ANCHURA	PROFUN- DIDAD MEDIA	ÁREA	GASTO PARCIAL	OBSERVACIONES						
m	2	m	3	m	4	5	6	7	m/s	8	9	10	m	11	12	13	14	15	

Columna 2: profundidad, considerada desde el nivel del agua hasta el fondo del cauce (m).

Servicio hidrométrico		FECHA: _____	AFORO NUMERO _____
ESTACION _____	MOLINETE: _____	MOLINETE: _____ <small>UNIDAD, TIPO Y NUMERO</small>	PROMEDIO LECT. ESC. _____ m
CORRIENTE _____	OBSERVADOR: _____	PRINCIPIO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____	ÁREA TOTAL _____ m ²
CUENCA _____	TERMINO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____		VELOCIDAD MEDIA _____ m/s
			GASTO TOTAL _____ m ³ /s

Figura 5.11 Libreta de aforo, llenado de la columna 4.

REGISTRO DE AFORO CON MOLINETE

SONDEOS			MOLINETE			VELOCIDAD			SECCIÓN		OBSERVACIONES					
DISTAN- CIA DEL PUNTO INICIAL	PROFUN- DIDAD DE LA OBSERVACIÓN	Método	PROFUN- DIDAD DE LA OBSERVACIÓN	TIEMPO EN SEGUN- DOS	REVOLU- CIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEFI- CIENTE	MEDIA DEL TRAMO	ANCHURA	PROFUN- DIDAD MEDIA		ÁREA	GASTO PARCIAL			
1	m		2	m	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Columna 4: profundidad (m) a que se realiza la medición de la velocidad, resulta del producto de las columnas 2 y 3.

ESTACIÓN	Fecha:	Aforo numero
CORRIENTE	MOLINETE: <small>MARCA, TPO Y NUMERO</small>	PROMEDIO LECT. ESC. _____ m
CUENCA	OBSERVADOR: _____	AREA TOTAL _____ m ²
	PRINCIPIO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____	VELOCIDAD MEDIA _____ m/s
	TERMINO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____	GASTO TOTAL _____ m ³ /s

Figura 5.12 Libreta de aforo, llenado de la columna 5.

SONDEOS				MOLINETE				VELOCIDAD				SECCIÓN			GASTO PARCIAL	OBSERVACIONES				
DISTAN- CIA DEL PUNTO INICIAL	m	PROFUN- DIDAD	m	PROFUN- DIDAD DE LA OBSERVACIÓN	m	TIEMPO EN SEGUN- DOS	REVOLU- CIONES	MOLINETE	NÚMERO DE REVOLU- CIONES	REVOLU- CIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO	m/s	COEFI- CIENTE	MEDIA DEL TRAMO	m/s	ANCHURA	PROFUN- DIDAD MEDIA	ÁREA	14	15
1		2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13						

Columna 5: número de revoluciones (R), proporcionadas por el molinete.

Estación _____	Fecha: _____	Aforo número _____
Corriente _____	Molinete: _____ <small>MARCA, TIPO Y NÚMERO</small>	Promedio lect. esc. _____ m
Cuenca _____	Observador: _____	Área total _____ m ²
	Principio: _____ A _____ min. lect. esc. _____	Velocidad media _____ m/s
	Termino: _____ A _____ min. lect. esc. _____	Gasto total: _____ m ³ /s


Figura 5.13 Libreta de aforo, llenado de la columna 6.

SONDEOS				MOLINETE				VELOCIDAD				SECCIÓN				OBSERVACIONES				
DISTAN- CIA DEL PUNTO INICIAL	PROFUN- DIDAD	PROFUNDIDAD DE LA OBSERVACIÓN	Método	NÚMERO DE REVOLU- CIONES	TIEMPO EN SEGUN- DOS	REVOLU- CIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEFI- CIENTE	MEDIA DEL TRAMO	ANCHURA	PROFUN- DIDAD MEDIA	ÁREA	GASTO PARCIAL	RELATIVAS A VARIACIONES U OBSTRUCCIONES EN EL CAUCE, VIENTO, ANOMALÍAS EN LOS INSTRUMENTOS Y MÉTODOS USADOS, DESBORDAMIENTOS AGUAS ARRIBA DEL CABLE, CONDICIONES DEL FONDO DE CAUCE, PESO Y TIPO DEL ESCANDALLO, MÉTODO DE SUSPENSIÓN, ETC.						
1	m	2	m	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15				

Columna 6: tiempo (T) en segundos, que duró la observación.

Servicio hidrométrico		ESTACION _____ CORRIENTE _____ CUENCA _____	FECHA: _____ MOLINETE: _____ MARCA, TIPO Y NÚMERO _____ OBSERVADOR: _____ PRINCIPIO: A _____ min. LECT. ESC. _____ TERMINO: A _____ min. LECT. ESC. _____	AFORO NÚMERO _____ PROMEDIO LECT. ESC. _____ m ÁREA TOTAL _____ m ² VELOCIDAD MEDIA _____ m/s GASTO TOTAL _____ m ³ /s
-----------------------	--	---	---	--

Figura 5.14 Libreta de aforo, llenado de la columna 7.




REGISTRO DE AFORO CON MOLINETE

SONDEOS	MOLINETE			VELOCIDAD			SECCIÓN			OBSERVACIONES				
	DISTAN- CIA DEL PUNTO INICIAL	PROFUN- DIDAD DE LA OBSERVACIÓN	NÚMERO DE REVOLU- CIONES	TIEMPO EN SEGUN- DOS	REVOLU- CIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEFI- CIENTE	MEDIA DEL TRAMO	AN- CHURA		PROFUN- DIDAD MEDIA	ÁREA	GASTO PARCIAL	
														REVOLU- CIONES POR SEGUNDO
m	2	m	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Columna 7: número de revoluciones por segundo (N), resulta de dividir la columna 5 entre la 6 ($N=R/T$). Se obtiene únicamente cuando no se dispone de la tabla, pero sí de la ecuación.

Servicio hidrométrico		
ESTACION _____	FECHA: _____	AFORO NUMERO _____
CORRIENTE _____	MOLINETE: _____ <small>MARCA, TIPO Y NÚMERO</small>	PROMEDIO LECT. ESC. _____ m
CUENCA _____	OBSERVADOR: _____	AREA TOTAL _____ m ²
	PRINCIPIO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____	VELOCIDAD MEDIA _____ m/s
	TERMINO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____	GASTO TOTAL _____ m ³ /s

Figura 5.15 Libreta de aforo, llenado de la columna 8.



REGISTRO DE AFORO CON MOLINETE

SONDEOS				MOLINETE			VELOCIDAD			SECCION		OBSERVACIONES	
DISTAN- CIA DEL PUNTO INICIAL m	PROFUN- DIDAD m	PROFUN- DIDAD DE LA OBSERVACION m	NUMERO DE REVOLU- CIONES	TIEMPO EN SEGUN- DOS	REVOLU- CIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO m/s	COEFI- CIENTE	MEDIA DEL TRAMO m/s	ANCHURA	PROFUN- DIDAD MEDIA	AREA		GASTO PARCIAL
1	2	3 Método	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15


Columna 8: velocidad en el punto (m/s); si el método es el superficial o el de 6/10, se tendrá una sola medición; pero si es el de 2/10 y 8/10, se tendrán dos mediciones. Esta velocidad se obtiene entrando con los valores de R y T, en la tabla de calibración, que le corresponde únicamente al molinete empleado.

ESTACION _____	AFORO NUMERO _____
CORRIENTE _____	PROMEDIO LECT. ESC. _____ m
CUENCA _____	AREA TOTAL _____ m ²
	VELOCIDAD MEDIA _____ m/s
	GASTO TOTAL _____ m ³ /s

Servicio hidrométrico

FECHA: _____	MOLINETE: _____ <small>MARCA, TIPO Y NUMERO</small>
OBSERVADOR: _____	PRINCIPIO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____
TERMINO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____	

Figura 5.17 Libreta de aforo, llenado de la columna 10.




REGISTRO DE AFORO CON MOLINETE

SONDEOS	MOLINETE				VELOCIDAD				SECCIÓN			OBSERVACIONES	
	DISTAN- CIA DEL PUNTO INICIAL m	PROFUN- DIDAD DE LA OBSERVACIÓN m	NÚMERO DE REVOLU- CIONES	TIEMPO EN SEGUN- DOS	REVOLU- CIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEFI- CIENTE	MEDIA DEL TRAMO	ANCHURA	PROFUN- DIDAD MEDIA	ÁREA		GASTO PARCIAL
1		3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Columna 10: proporciona la velocidad media en la franja (m/s), se obtiene según el método empleado para determinar la velocidad; si el método es de 6/10 la velocidad es la misma que en la columna 8; si es el superficial, la velocidad se obtiene del producto de las columnas 8 y 9; si es el método 2/10 y 8/10 la velocidad media, se obtiene promediando las dos velocidades que se tienen en la columna 8 para la misma vertical.

ESTACIÓN _____ CORRIENTE _____ CUENCA _____	Servicio hidrométrico FECHA: _____ MOLINETE: _____ MARCA, TIPO Y NÚMERO _____ OBSERVADOR: _____ PRINCIPIO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____ TERMINO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____	AFORO NÚMERO _____ PROMEDIO LECT. ESC. _____ m ÁREA TOTAL _____ m ² VELOCIDAD MEDIA _____ m/s GASTO TOTAL _____ m ³ /s
---	--	--

Figura 5.21 Libreta de aforo, llenado de la columna 14.




REGISTRO DE AFORO CON MOLINETE

SONDEOS				MOLINETE				VELOCIDAD				SECCIÓN				OBSERVACIONES
DISTAN- CIA DEL PUNTO INICIAL	PROFUN- DIDAD	PROFUN- DIDAD DE LA OBSERVACIÓN	Método	NUMERO DE REVOLU- CIONES	TIEMPO EN SEGUN- DOS	REVOLU- CIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEFI- CIENTE	MEDIA DEL TRAMO	ANCHURA	PROFUN- DIDAD MEDIA	ÁREA	GASTO PARCIAL			
m	m	m					m/s	m/s	m/s	m	m ²	m ³ /s				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		

Columna 14: gasto parcial (m³/s) o gasto que pasa a través de la franja considerada, se obtiene multiplicando las columnas 10 y 13.

ESTACION _____ CORRIENTE _____ CUENCA _____	Servicio hidrométrico	FECHA: _____ MOLINETE: _____ OBSERVADOR: _____ PRINCIPIO: ____ A ____ min. LECT. ESC. _____ TERMINO: ____ A ____ min. LECT. ESC. _____	AFORO NUMERO _____ PROMEDIO LECT. ESC. _____ m ³ /s AREA TOTAL _____ m ² VELOCIDAD MEDIA _____ m/s GASTO TOTAL _____ m ³ /s
---	-----------------------	--	--

Figura 5.22 Libreta de aforo, valores totales del área, gasto y velocidad media.



REGISTRO DE AFORO CON MOLINETE

RELATIVAS A VARIACIONES U OBSTRUCCIONES EN EL CAUCE, VIENTO, ANOMALÍAS EN LOS INSTRUMENTOS Y MÉTODOS USADOS. DESBORDAMIENTOS AGUAS ARRIBA DEL CABLE, CONDICIONES DEL FONDO DE CAUCE, PESO Y TIPO DEL ESCANDALLO, MÉTODO DE SUSPENSIÓN, ETC.

15

SONDEOS				MOLINETE			VELOCIDAD			SECCIÓN			OBSERVACIONES	
DISTAN- CIA DEL PUNTO INICIAL	PROFUN- DIDAD	PROFUN-DI-DAD DE LA OBSERVACIÓN	Método	NÚMERO DE REVOLU- CIONES	TIEMPO EN SEGUN- DOS	REVOLU- CIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEFI- CIENTE	MEDIA DEL TRAMO	ANCHURA	PROFUN- DIDAD MEDIA	ÁREA		GASTO PARCIAL
m	m	m		5	6	7	m/s 8	9	m/s 10	11	12	13	14	

Finalmente, el área de la sección transversal se obtiene sumando los valores de la columna 13. El gasto total se obtiene sumando la columna 14. La velocidad media es la división del gasto total entre el área total.

<p>Servicio hidrométrico</p> <p>ESTACIÓN _____</p> <p>CORRIENTE _____</p> <p>CUENCA _____</p>	<p>FECHA: _____</p> <p>MOLINETE: _____ MARCA, TIPO Y NÚMERO _____</p> <p>OBSERVADOR: _____</p> <p>PRINCIPIO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____</p> <p>TERMINO: _____ A _____ min. LECT. ESC. _____</p>
<p>Aforo Número _____ m</p> <p>Promedio Lect. Esc. _____ m²</p> <p>Área Total _____ m/s</p> <p>Velocidad Media _____ m²/s</p> <p>Gasto Total: _____ m³/s</p>	

6

BUENAS PRÁCTICAS EN EL AFORO CON MOLINETE

Cuando se afora se tiene la impresión de que se hace bien o al menos con una calidad adecuada. Sin embargo, ello tiene origen en la intuición o en un sentimiento, por lo que la opinión resulta subjetiva. Es conveniente saber que se tienen herramientas que disminuyen la subjetividad. Dichas herramientas forman parte del cuerpo de conocimiento llamado “metrología” que es la “ciencia que tiene por objeto el estudio de los sistemas de pesas y medidas” (www.rae.es). A continuación se presentan algunos conceptos útiles para conocer la calidad de los aforos.

6.1. ALGUNOS CONCEPTOS DE METROLOGÍA APLICADOS AL AFORO CON MOLINETE

Se hace la aclaración que a menos que se indique otra referencia, los conceptos enseguida mencionados se encuentran en la norma oficial mexicana NMX-Z-055-IMNC-2009 “Vocabulario Interna-

cional de metrología. Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM)”, elaborada por el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A.C. en el año 2009.

6.1.1. Magnitud

La magnitud es el primer concepto al que se hace referencia y en la norma se menciona que es la “propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia”. Esto quiere decir que una magnitud es un número, y puede interpretarse como el tamaño de alguna propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia. Para el caso de los aforos, la magnitud es el número asociado al gasto.

6.1.2. Unidad de medida

La unidad de medida o únicamente “unidad” es una “magnitud escalar real, definida y adoptada por convenio, con la que se puede comparar cualquier

otra magnitud de la misma naturaleza para expresar la relación entre ambas mediante un número". La definición de la norma parece un poco complicada, pero para el caso de los aforos en ríos o canales, las unidades más usuales son los metros cúbicos por segundo (m^3/s).

6.1.3. Mensurando

Según la norma mencionada anteriormente, el mensurando es la "magnitud que se desea medir". Para este caso, el mensurando es el gasto o caudal.

6.1.4. Medición

En la norma consultada se indica que "medida" es un sinónimo de "medición" y se define como el "proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud". Se aclara que en la norma se usa la palabra "medida" por lo que, consecuentemente, en este texto se hará lo mismo. Para el tema de este libro, la medición es el aforo.

6.1.5. Valor verdadero de una magnitud.

Su mismo nombre lo define, es un valor único al que se le atribuye la característica de verdadero. En la norma referida, se lee que "en el enfoque en tomo al concepto de error, el valor verdadero de la magnitud se considera único y, en la práctica, imposible de conocer..."; en cuanto al enfoque de la

incertidumbre se afirma que "debido a la cantidad de detalles incompletos inherentes a la definición de una magnitud, no existe un único valor verdadero compatible con la definición, sino más bien un conjunto de valores verdaderos compatibles con ella. Sin embargo, este conjunto de valores es, en principio, imposible de conocer en la práctica".

De lo anterior se concluye que el valor verdadero del gasto es imposible de conocer. Esto se puede corroborar al aforar bajo las mismas condiciones y en repetidas ocasiones y observar que no se obtiene el mismo valor; surge la duda de saber cuál es el valor verdadero, duda que nunca se podrá esclarecer.

6.1.6. Valor convencional de una magnitud

En la norma se menciona que es el "valor asignado a una magnitud, mediante un acuerdo, para un determinado propósito". El valor puede asignarse de varias maneras, por ejemplo, al aforar se presume que se hace con cierto cuidado y el único valor obtenido adquiere la característica de "valor convencional"; éste es el caso aplicado en la mayoría de los aforos. Por otro lado, si fuese posible aforar en repetidas ocasiones, el valor convencional del gasto podría ser el promedio. Finalmente, en una situación más formal, el valor convencional se expresa con un valor aunado a una incertidumbre, por ejemplo $10 \pm 0.005 m^3/s$. Lo cual debe interpretarse como que el valor convencional del gasto es de $10 m^3/s$, pero probablemente el valor ver-

dadero es mayor o menor en una magnitud máxima de $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$. Más adelante se mencionará en detalle el concepto de “incertidumbre”.

En seguida, se menciona un grupo muy importante de conceptos: el de los errores. El conocimiento adecuado de dichos conceptos es muy conveniente para lograr la mejor calidad de los aforos.

6.1.7. Error de medida

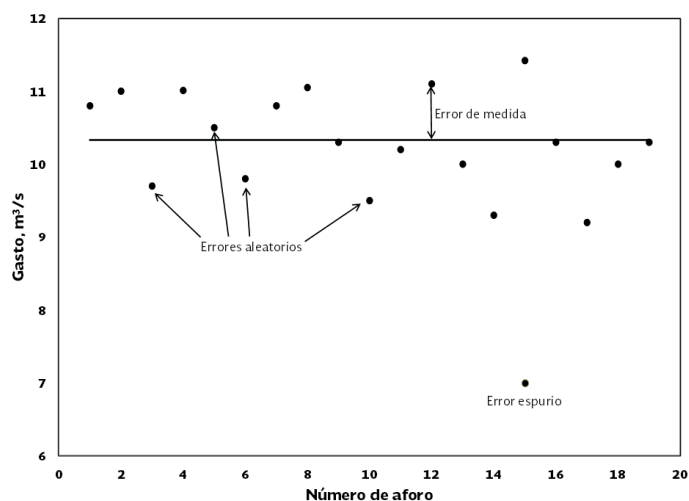
En la norma consultada se menciona que el error de medida es la “diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia”. Dicho valor de referencia puede ser el adquirido mediante calibración o bien puede ser el valor promedio de una serie de datos. Es importante recalcar que el error de medida es un valor dado entre el resultado de una medición aislada y un valor de referencia. En la medición de corrientes en un río o canal, en la que se afora simultáneamente con dos molinetes, el error de medida es la diferencia

entre ambos resultados. Se advierte que la elaboración de conclusiones al respecto se debe hacer con cuidado, ya que en principio y con dos valores únicamente es imposible saber cuál de los dos es mejor. Para realizar análisis con intenciones de conocer la calidad del aforo, lo recomendable es aforar repetidamente y comparar grupos de datos y no únicamente un par de ellos.

6.1.8. Error aleatorio de medida

También llamado “error aleatorio”, es la “componente del error de medida que, en mediciones repetidas, varía de manera impredecible”. Se trata de un conjunto de valores que se pueden comparar con un valor de referencia o bien con su propio promedio, pero como tiene un comportamiento errático, no se tiene un valor general del error; cada error tiene un valor único. En este caso no es posible eliminar el error en los datos ya recopilados, ni en el proceso de medida, porque su origen es inherente a dicho proceso.

Figura 6.1 Diferentes tipos de errores en los aforos



Para intentar aclarar los diferentes tipos de errores se presenta la gráfica de la Figura 6.1, en ella que se pueden ver tres tipos de errores. Se debe mencionar que es un ejemplo ficticio en el que se supone tener aforos repetidos en un periodo en el que el gasto no varía. Este caso es muy raro en los aforos de ríos porque sería muy tardado tener tantas mediciones y es muy posible que varíe el gasto.

El primer error que se describe es el error de medida, este error puede ser o bien, la diferencia de un valor del gasto con el promedio de gastos, si se tienen varios valores de repeticiones de aforo; o también puede ser la diferencia entre dos gastos de dos aforos con dos molinetes o con otro tipo de medidor.

Otro tipo de error que se muestra es el error aleatorio; este error es inevitable y es resultado del acto de medir. Como se puede apreciar el error tiene un comportamiento más o menor errático entre una franja de valores aproximadamente fija. Una de sus características importantes es que a veces está por arriba del promedio y otras por debajo. El error aleatorio en los aforos con molinete puede surgir por las siguientes causas:

- a. Errores en longitudes.** Al medir con la cinta métrica se puede medir a veces de más o a veces de menos.
- b. Al sondear.** Uno de los procesos que genera potencial fuente de errores, es la medición de la profundidad del agua (sondear). Se sumerge el conjunto de molinete

te y escandallo hasta que la parte baja del escandallo toca el fondo del río, se marca de alguna manera la cuerda o cable y luego se saca el conjunto hasta que el escandallo rosa la superficie del agua, se vuelve a marcar el cable y se mide la distancia entre las dos marcas que se hicieron en la cuerda o cable. Como puede suponerse, este proceso es muy susceptible de generar errores de longitud.

c. Al colocar el molinete para conteo. Para ubicar el molinete a la profundidad adecuada para iniciar el conteo, se procede de una manera muy parecida al proceso de sondeo, incurriendo en la misma posibilidad de errores de longitud.

d. En el conteo de las revoluciones. En el proceso de conteo puede suceder que en ocasiones se inicie el conteo antes de lo debido o después; o lo mismo puede suceder en el proceso de maniobrar el cronómetro.

Error sistemático de medida

○ simplemente “error sistemático”, es la “componente del error de medida que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible”. También conviene recalcar que en este tipo de error se relaciona un conjunto de datos con un valor único de referencia. Ello significa que la magnitud o tamaño del error puede ser único si el error permanece constante o bien, variar con una tendencia conocida si el error tiene

un comportamiento previsible; el primer caso es más común.

Otra característica importante del error sistemático es que es posible su eliminación por medio de una corrección a los datos ya tabulados o bien una corrección en la operación de medida si se ha detectado la causa del error. Por otro lado es pertinente mencionar que su presencia es eventual y que solamente se puede detectar y corregir si se tiene un valor de referencia, no sirve el valor promedio del conjunto de los datos. Finalmente se debe mencionar que los errores sistemáticos incluyen inevitablemente errores aleatorios.

En los aforos con molinete se debe pensar en todos aquellos hechos, fenómenos o eventos que pueden causar un error que siempre esté presente en una magnitud aproximadamente igual. En seguida se mencionan algunas posibles causas.

Calibración incorrecta del molinete. Al tener una calibración incorrecta, el molinete arrojará valores sistemáticamente erróneos, el aforo será mayor o menor al real. La falta de calibración se puede deber a que se ha usado mucho el molinete y ha transcurrido el periodo recomendado para recalibración.

Arrastre del molinete. En ocasiones la corriente del agua empuja el molinete y ello hace que el molinete no quede ubicado a la profundidad adecuada.

Error espurio o accidental

Para definir este tipo de error se cita textualmente lo que dice Santana (2007):

El error espurio es causado por accidentes, de ahí que también se le conozca como error accidental. Este tipo de error se presenta cuando ocurren fallas humanas, por la falta de cuidado o incapacidad física, en el momento de realizar la medición. Algunos factores importantes que generan este tipo de error son: mala ubicación de los aparatos, selección equivocada de los valores de referencia, sentido de la vista deficiente, etc. Estos errores espurios son los que parecen “dispararse” del resto de los datos medidos, que por lo general tienden a ajustarse a un comportamiento esperado.

Por lo tanto, el error espurio es fácil de detectar porque es un valor muy alejado de lo que se espera encontrar. Cuando el error accidental aparece una o dos veces en un experimento no se considera grave. Otra cosa muy diferente es que se tengan errores en todas o en casi todas las lecturas, claramente esto no es un error espurio y se trata de otro tipo de error.

El error espurio se puede apreciar en la Figura 6.1 anterior. A simple vista se observa que se encuentra alejado del grupo de valores. Este tipo de

errores pueden tener diferentes causas como ya se indicó, pero en los aforos se puede deber, por ejemplo, a que en el momento del conteo, alguna maleza flotante se atoró momentáneamente en las copas del molinete.

En seguida se presenta un ejemplo real (Figura 6.2). Se trata de los aforos de las extracciones de una presa de almacenamiento. Se midió durante varios días con molinete en la estación de aforo, situada aguas abajo de la salida de la obra de toma, y además con un aforador ultrasónico de tiempo de tránsito colocado en el interior de los túneles presurizados de la presa.

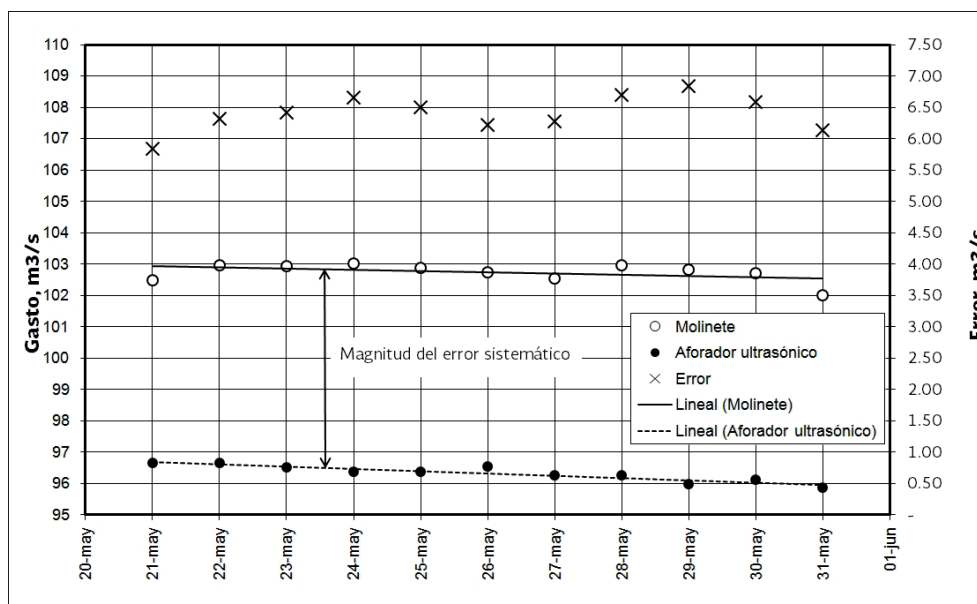
Como puede observarse, en el aforo con molinete se obtiene un gasto mayor que el obtenido con el aforador ultrasónico, y la magnitud del error es, precisamente, sistemático, ya que se mantiene

aproximadamente en un mismo valor. Se hace la aclaración que se adicionó la línea de tendencia de los grupos de valores, tanto de las mediciones del molinete, como de las mediciones con el aforador ultrasónico, dado que al extraer agua de la presa el nivel en el vaso disminuye, con la consecuente extracción de gastos sucesivamente menores. Dicha línea de tendencia se incluye para hacer notar un hecho importante: el error sistemático incluye inevitablemente errores aleatorios, es por ello que los valores puntuales fluctúan alrededor de la línea de tendencia.

Incertidumbre de medida

Uno de los conceptos más importantes e interesantes en los aforos y en cualquier medición, es la incertidumbre. En la norma consultada se dice que, al igual que los conceptos anteriores, se pueden

Figura 6.2 Error sistemático en el aforo de las extracciones de una presa



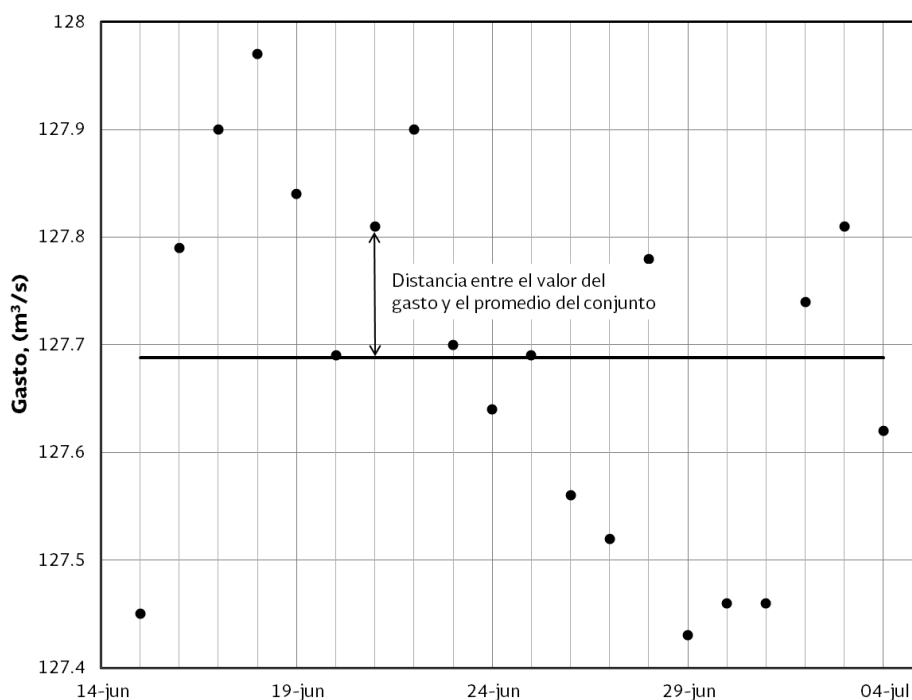
eliminar las palabras “de medida” y manejar únicamente la palabra “incertidumbre”. Su definición es: “parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza”. Este parámetro es una medida del tamaño de la dispersión de los valores respecto a su propio promedio.

En la gráfica anterior (Figura 6.3), se muestra un caso real de aforos con molinete, se trata de aforos diarios y se seleccionó un grupo de datos en los que presumiblemente no se tuvo movimiento en el gasto. La incertidumbre se puede interpretar como una medida de la dispersión de los datos. En la gráfica se muestran los gastos tal y como se presentan en la libreta de aforos, también se dibujó la línea que representa el promedio de todos los da-

tos, dicha línea de promedios sirve como referencia para indagar sobre la dispersión de los datos, los datos estarán muy dispersos si se encuentran muy alejados de la línea de promedio y viceversa.

En la gráfica se tiene una dispersión aparentemente alta, sin embargo, basta mirar la escala de gastos en el eje de las ordenadas para observar que la dispersión es en realidad muy baja. Para eliminar la subjetividad de una simple observación se puede recurrir a una herramienta de la estadística llamada “desviación estándar”. La desviación estándar es una fórmula matemática por medio de la cual se calcula el promedio de las distancias de todos los datos experimentales. Cuando la incertidumbre se calcula por medio de la desviación estándar se le llama “incertidumbre típica”.

Figura 6.3 Incertidumbre: medida de la dispersión de datos



La desviación estándar se calcula con la ecuación (6.1).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (6.1)$$

Donde S es la desviación estándar; x_i cualquier valor de la variable medida (en este caso, cualquier dato del gasto); n es el número total de valores y \bar{X} es el promedio de todas las medidas (Miller et al, 1992).

En el caso de los aforos presentados en la Figura 6.3, el valor de la desviación estándar es de 0.17 m³/s y si se expresa como un porcentaje, es de únicamente el 0.13% del promedio.

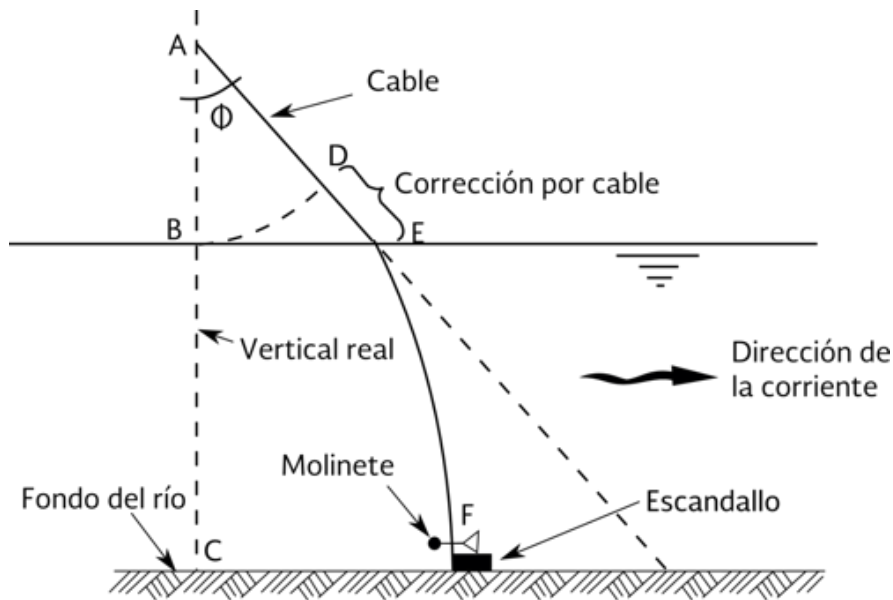
Es así que al aforar se debe tratar de tener incertidumbres bajas, evitar los errores sistemáticos y espurios. Afortunadamente, los errores aleatorios se nulifican con repetidas mediciones.

Al respecto de la incertidumbre típica del molinete, en la literatura se ubica en un valor de $\pm 5\%$.

6.2. ARRASTRE DEL MOLINETE

Kennedy et al (1992) indican que “debido al empuje de la corriente, el cable que sostiene el molinete, se desplaza un ángulo (ϕ) con respecto a la vertical (BC), presentando una curvatura (EF), esta lectura se debe corregir para obtener la profundidad real de la corriente” (Figura 6.4).

Figura 6.4 Corrección por arrastre del molinete debido a la fuerza de la corriente



(Fuente: Kennedy et al, 1992, p. 12)

Kennedy propone corregir la profundidad real de la corriente, usando la ecuación (6.2).

$$BC = (1 - k) EF \quad (6.2)$$

Donde BC es la profundidad real de la corriente (m); k es un coeficiente de corrección (Cuadro 6.1) y EF es la longitud del cable.

Sin embargo, debe tenerse cuidado al seguir la recomendación anterior; ya que con dicha recomendación se corrige la profundidad de la corriente, pero no se dice nada sobre corregir la profundidad a la que se colocará el molinete para el conteo de las revoluciones. De hecho, la recomendación anterior rara vez se lleva a cabo, incluso la libreta de aforos no tiene espacio para hacer la corrección.

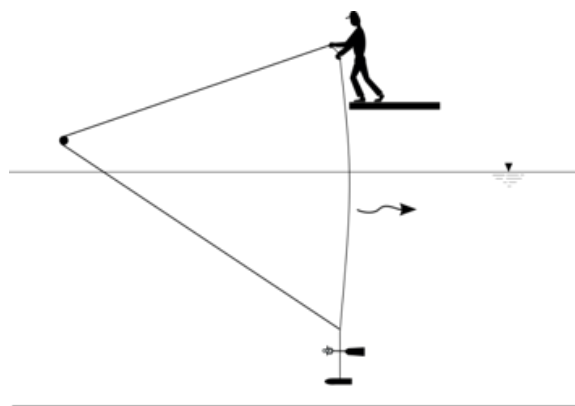
Cuadro 6.1 Corrección por desviación de la vertical

Ángulo (grados)	Corrección (k)
10	.0050
12	.0072
14	.0098
16	.0128
18	.0164
20	.0204
22	.0248
24	.0296
26	.0350
28	.0408
30	.0472
32	.0544
34	.0620
36	.0698

También conviene mencionar que el arrastre del molinete debido al empuje de la corriente provocará que el molinete se eleve un poco respecto a la profundidad a la que se pretende colocar, y ello conducirá a un error sistemático.

Una solución más práctica, y que de hecho sí se lleva a cabo, para corregir el arrastre del molinete, es el uso de la "retenida". Se trata de un cable adicional que mediante un sistema de poleas y otro cable, tendido aguas arriba de la sección de aforo, de orilla a orilla, evita del arrastre del molinete (ver Figura 6.5).

Figura 6.5 "Retenida" para evitar el arrastre del molinete



6.3. NÚMERO DE DOVELAS EN LA SECCIÓN

Kennedy et al (1992) recomiendan los siguientes anchos de las franjas, en función del ancho total de la corriente (Cuadro 6.2).

Cuadro 6.2 Ancho de las franjas en función del ancho de la corriente, según Kennedy et al (1992)

Anchos (m)	
De la corriente	De la franja
Hasta 1.2	0.2 - 0.3
1.2 - 5	0.3 - 0.5
5 - 10	0.5 - 1.0
10 - 50	1.0 - 5.0
50 - 100	5.0 - 10.0
Más de 100	10.0 - 20.0

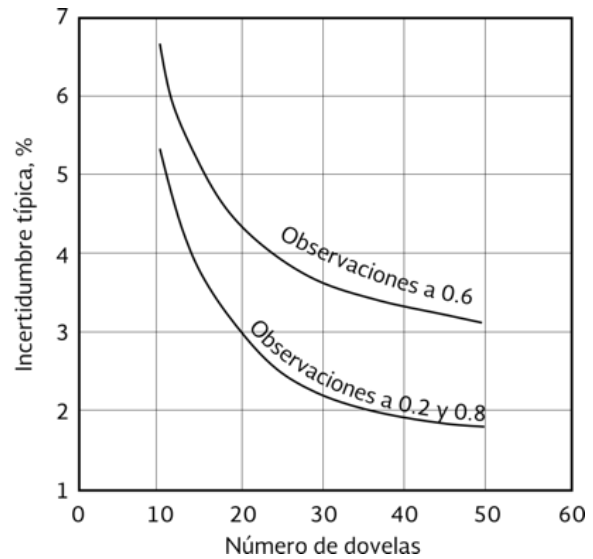
En el libro denominado "Instructivo para aforo de corrientes" (Comisión Nacional del Agua, 1993), se recomiendan los siguientes anchos.

Cuadro 6.3 Ancho de las franjas en función del ancho de la corriente, según Devesa (1993)

Anchos (m)	
De la corriente	De la franja
Hasta 1.2	0.1
1.2 - 3	0.2
3 - 5	0.3
5 - 8	0.4
8 - 12	0.5
12 - 18	0.8
18 - 25	1.0
25 - 35	1.5
35 - 50	2
50 - 70	3
70 - 100	4
Más de 100	5

Según Karter y Anderson (1963), el número de dovelas debería ser más bien alto. Obsérvese la gráfica de la Figura 6.6. Se tendrá una incertidumbre menor al 2% si se usan 50 dovelas y se hacen observaciones a 0.2 y 0.8 de la profundidad de la corriente.

Figura 6.6 Incertidumbre típica de aforo con molinete, de acuerdo al número de dovelas



(Fuente: Kennedy et al, 1992, p. 12)

Al respecto de la gráfica, se ha mencionado que la incertidumbre típica de los aforos con molinete es de 5%, ello quiere decir que si se afora colocando el molinete a seis décimos de la profundidad de la corriente, se han usado unas 16 dovelas; o si se usa la medición a 0.2 y 0.8 de la profundidad, se han usado unas once dovelas.

6.4. NÚMERO IDEAL DE REPETICIONES EN LOS AFOROS

En la práctica común de los aforos se utilizan seccionamientos a cada tres metros en corrientes medianas y a cada 5 en corrientes grandes; se sumerge el molinete a 0.6 de la profundidad y se

cuentan las revoluciones durante 40 segundos. Cabe preguntarse si esta circunstancia es la ideal.

Se puede tener alguna idea de la respuesta si se recurre a Karter y Anderson (1963). Al respecto del número ideal de dovelas o seccionamientos, se puede atender nuevamente a la figura 6.6. En dicha gráfica, es claro notar que el aumento sustancial de seccionamientos, no es proporcional a la disminución de la incertidumbre; un aumento de 20 a 50 dovelas, disminuye apenas un punto porcentual a la incertidumbre. Afirmar categóricamente cuál es el número ideal de franjas de aforo o dovelas, no es determinante, pero si se usan 15 o más dovelas, se tendrá una incertidumbre aceptable, menor a los cinco puntos porcentuales.

Como se puede observar en la Cuadro 6.4, el aumento en el periodo de conteo no es proporcional a la disminución de la incertidumbre, una diferencia de tiempo de conteo de 15 a 240 segundos es de 225 segundos y la disminución de incertidumbre es de solo 4 puntos porcentuales, aproximadamente (considerando sólo los casos factibles de aforo de 0.6 y del promedio de 0.2 y 0.8).

Si se afora a 0.6 de la profundidad del agua, se debería contar al menos 120 segundos para no rebasar el 5% de incertidumbre. En cambio si se afora a 0.2 y 0.8 de la profundidad, se pueden contar las revoluciones del molinete durante 30 segundos. Estas recomendaciones se hacen basadas en la idea de no rebasar la incertidumbre típica del aforo con molinete reportada en la literatura de 5%.

Se ha indicado que la profundidad habitual a la que se coloca el molinete, es de seis décimos de la profundidad del agua. No se considera factible que dicho hábito se cambie, pero es claro en los resultados presentados por Karter y Anderson (1963), que es mejor aforar a dos décimos y ocho décimos de la profundidad del agua y promediar los resultados.

Debe aclararse que todos los valores de incertidumbre típica presentados por Karter y Anderson, son el resultado de cálculos basados en la desviación estándar de conjuntos de datos producto de aforos o mediciones que no se comparan con otro método de aforo. Ello quiere decir que las desviaciones estándar así calculadas son un indi-

Cuadro 6.4 Incertidumbre típica de aforos, en función de la profundidad del molinete y del tiempo de conteo

Ubicación del molinete	Segundos de conteo							
	15	30	45	60	90	120	180	240
0.2	5.7	4.7	4.2	3.8	3.3	2.9	2.5	2.0
0.6	7.5	6.4	5.6	5.2	5.2	4.6	3.6	3.4
0.8	10.3	8.0	7.2	6.4	5.6	5.0	4.4	3.6
	5.9	4.6	4.2	3.7	3.3	2.9	2.5	2.1

(Fuente: Karter y Anderson, 1963. p. 89)

cativo de la dispersión de los datos de medición, pero no se informa sobre la distancia que hay entre estos datos y el valor verdadero o el valor convencionalmente verdadero del gasto. Sin embargo, sí se presentan comparaciones simultáneas de aforo en presas hidroeléctricas y de aforos con molinete aguas abajo de dichas presas. Las presas están ubicadas en el río Columbia del estado de Washington (Cuadro 6.5). La medición de gastos en las presas se hizo con medidores diferenciales de presión con un error máximo probable de 1.4% de los gastos aforados.

Cuadro 6.5 Diferencia de gastos entre aforos simultáneos con molinete y aforos en presas hidroeléctricas

Presa	Número de comparaciones	Promedio de diferencia (%)
Chief Joseph	30	0.9
Ice Harbor	40	0.9
McNary	74	0.9

(Fuente: Karter y Anderson, 1963. p. 89)

En la conclusión del artículo consultado (Karter y Anderson, 1963) se encuentra una anotación interesante.

Todos los errores, excepto los errores del molinete, podrían ser virtualmente eliminados observando la profundidad y la velocidad en un número grande de puntos en la sección. Sin embargo, el costo adicional podría no justificarse. Una precisión de 2 o 3 % es totalmente adecuada para la mayoría de los propósitos. Se ha demostrado que la desviación estándar del error total de un aforo típico es de 2.3%, para una sección transversal de 30 dovelas, con tiempos de conteo de 45 segundos y dos puntos de observación (0.2 y 0.8) de la profundidad del agua.

Del comentario anterior, se destaca la recomendación de los autores: una buena práctica para aforar es hacerlo con al menos 30 dovelas, 45 segundos de conteo de las revoluciones del molinete y colocación del mismo en dos puntos de la profundidad de la corriente (0.2 y 0.8).

REFERENCIAS

- Bautista B. J. G., Rubio G. H., Pérez L. G. y Hernández J. E. M. (2012) *Estimación de la disponibilidad media anual de las aguas superficiales: estado actual y perspectivas*. Acapulco Guerrero México. Memorias del XXII Congreso Nacional de Hidráulica. AMH.
- Carter R.W. Anderson I. E. (1963) Accuracy of Current Meter Measurement. *Journal of the Hydraulics Division*. 89 (4). 105-115.
- De Saumarez H. (1729). *A further account of a new machine, called the marine surveyor, designed for the mensuration of the way of a ship at sea, more correctly than by the log, at present in use, or any other method hitherto invented for that purpose. By Mr. Henry De Saumarez, of the island of Guernsey, part of his majesty's antient dutchy of Normandy*. Philosophical Transaccions. 1729-1730. Pp 45-58. Tomado el 6 de junio de 2017 de: <http://rstl.royalsocietypublishing.org/>
- Devesa G. I. (1993). *Instructivo para aforo de corrientes*. México: Comisión Nacional del Agua.
- Frazier A. H. (1974). *Water Current Meters*. Whashington: Smithsonian Institute Press.
- Herrera P. J. C. y Peña P. E. (1997). *Instructivo Para Aforo con Molinete*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Kennedy P.A., Fragosa D. F., Peña P. E. y Moreno B. E. (1992). *Manual de Aforos*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- King H.W. (1993). *Manual de Hidráulica*. México: Uteha Noriega Editores.
- Levi Enzo. (1985). *El Agua según la Ciencia, Evolución de la Hidráulica*. México: UNAM,
- Martínez N. J. (2017). *Mantenimiento de Molinetes*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Miller I. R., Freund J. E. y Johnson R. (1992). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. México: Prentice-Hall.
- NMX-Z-055-IMNC-2009. *Vocabulario Internacional de metrología. Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM)*. México: Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A.C.
- Ocha A. L. (2000). *Métodos y sistemas de medición de gasto*. México: Comisión Nacional del Agua – Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pedroza G. E. (2016). *Propuesta didáctica para una mejor comprensión de los conceptos de hidráulica*. Trabajo no publicado. Tesis doctoral. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pérez L. G. y Rubio R. H. (2012). *Estado del arte en pronóstico hidrológico en México*. Acapulco Guerrero México. Memorias del XXII Congreso Nacional de Hidráulica. AMH.

- Pérez L. G. Martínez R. E. y Aguilar M. L. A. (2017). *Operación preventiva de vertedores para control de avenidas*. Acapulco Guerrero México. Memorias del XXIV Congreso Nacional de Hidráulica. AMH.
- Secretaría de Economía (2001). *Ley Federal sobre Metrología y Normalización*. México: Entidad Mexicana de Acreditación A. C.
- Santana S. J. S. (2007). *Introducción a la metrología en el contexto de la medición de agua*. En Pedroza G. E. (Ed.) *Medición del flujo volumétrico en presas, canales y pozos*. (pp. 7-30). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Sotelo A. G. (2009). *Hidráulica de canales*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Sotelo A. G. (1999). *Hidráulica General Volumen I Fundamentos*. México: Editorial Limusa.

