

Turbinas hidráulicas de alta velocidad específica

por MANUEL ESPINOSA H.

INTRODUCCIÓN

En el gran progreso introducido en las turbinas hidráulicas, en los últimos años, ninguno posiblemente más importante que la variedad de métodos propuestos y ensayados para resolver el problema de las turbinas de alta velocidad específica. Los perfeccionamientos más radicales se han efectuado en la mariposa y en el tubo de succión, obteniendo turbinas de gran velocidad específica y buena eficiencia.

La turbina de alta velocidad de tipo axial, llamada mariposa de succión o tipo propulsor es aquella en la cual el agua se mueve paralelamente al eje de la turbina. La característica principal de la mariposa de esta clase de turbinas es su pequeño número de álabes, preferentemente cuatro en comparación con las 15 a 30 del tipo corriente y por la ausencia del anillo que rodea a los álabes en la turbina Francis, haciendo que la mariposa del tipo propulsor sea muy semejante a las hélices de los buques.

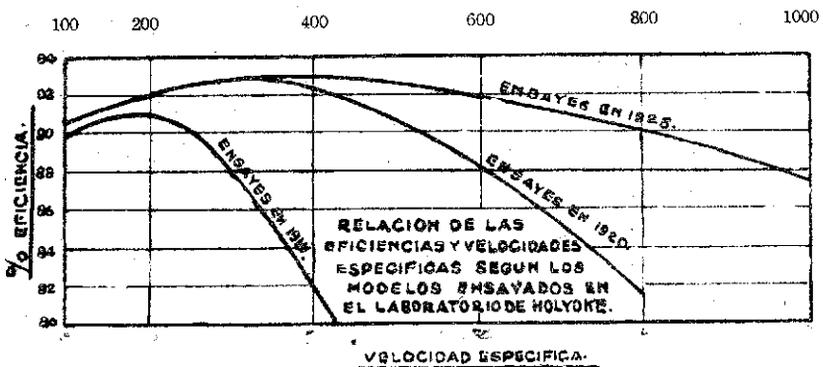


FIGURA 71

La figura 1 muestra las curvas de eficiencia a diversas velocidades específicas obtenidas hasta los años 1910, 1920 y 1925 basadas en los resultados obtenidos en el Laboratorio de Holyoke con modelos de mariposas de este tipo. Posiblemente se pueden obtener mejores resultados con grandes turbinas bien instaladas. De estas curvas se puede notar que se han obtenido muy pequeños mejoramientos desde 1910 para pequeñas velocidades específicas y que este progreso hasta 1920 es enteramente en las turbinas de una velocidad específica mayor de 360. Estas comparaciones justifican el interés que se ha dedicado al perfeccionamiento de las turbinas de alta velocidad específica.

Este tipo de turbinas tiene gran importancia para las instalaciones de pequeñas caídas generalmente encontradas en los canales de regadío, en los ríos de pequeña pendiente, como son los nuestros después del valle central, y tendrán una gran aplicación en los ríos del Sur de pequeñas pendientes y grandes gastos.

DESCRIPCIÓN DE ALGUNAS PLANTAS DE ESTE TIPO

PLANTAS EUROPEAS

Chancy Pougny.—Esta planta aprovecha las aguas del Ródano, un poco abajo de Ginebra, en Suiza. Está formada por 5 unidades de 7,600 HP. 5.50 m. de diámetro, 92 M³/seg. de gasto, bajo una caída de 8.15 m., su velocidad específica es de 530 y dan 83.3 RPM. Fueron construidas por “Des Charmilles Company” de Ginebra.

Las turbinas son del tipo Francis modificado, garantidas para una eficiencia no menor de 90% con la mayor abertura de la válvula de admisión.

Matte.—Esta pequeña planta situada en la ciudad de Berna, Suiza, tiene un interés particular por la forma de su mariposa.

La planta consta de una sola unidad de 290 a 323 HP. instalada bajo una caída de 3.45 m., su velocidad específica es de 725 a 955, su velocidad varía de 200 a 250 RPM. y su eficiencia de 80 a 78%.

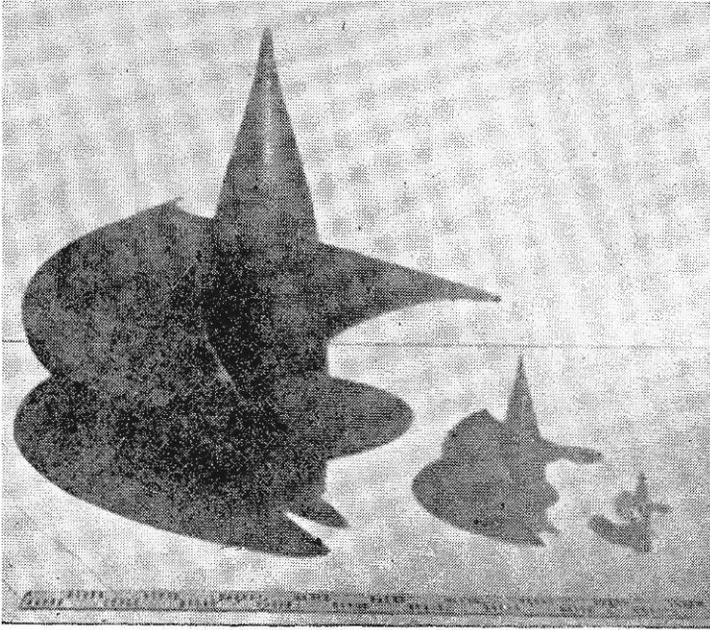


FIGURA 2

La forma de la mariposa es del tipo tornillo, tiene dos alabes en forma de alas de tirabuzón, que cubren cada una 180° de la circunferencia. La figura 2, muestra la mariposa y los dos pequeños modelos que usaron para los ensayos previos y la figura 3, la curva de eficiencia de esta turbina.

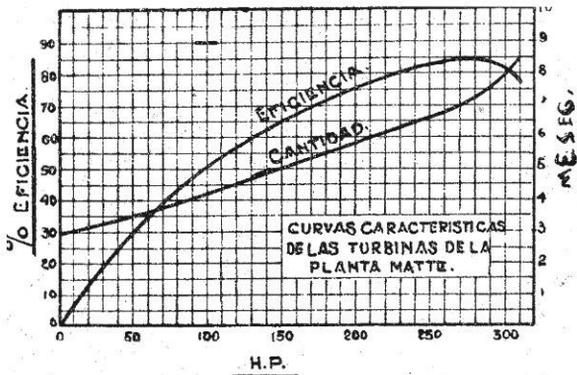


FIGURA 3

Fué construída por "Theodore Bell and Company", de Kreins, Suiza.

Siebenbrunn.—Esta turbina instalada en Siebenbrunn, Austria, es del tipo Kaplan de 400 HP., de 1.90 m. de diámetro, bajo una caída de 6.20 m., velocidad específica de 937 y de 250 RPM. Esta turbina fué fabricada por "J. M. Voith & Company", de Heidenheinn, Alemania.

Kachlet.—Esta planta situada en Kachlet, sobre el Danubio, en Alemania, está formada por turbinas tipo Kaplan con álabes fijos. Las turbinas son de 7,450 HP., 4.60 m. de diámetro, 7.65 m. de caída y su velocidad específica de 508. La mariposa está formada con seis álabes que cubren casi enteramente el área proyectada, en contraste con el tipo Kaplan corriente de 4 álabes que cubren al rededor de un cuarto del área proyectada (Fig. 4.)

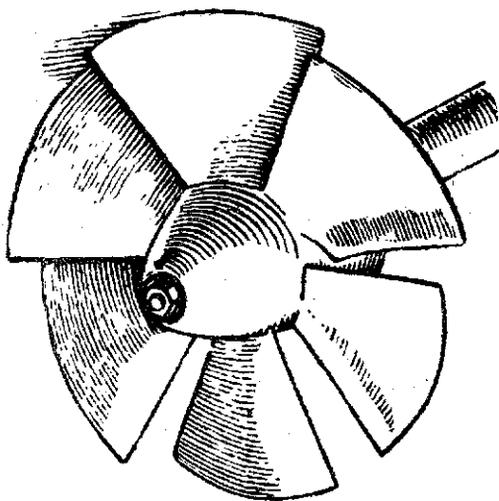


FIGURA 4

Wynau.—Esta planta del río Aare situada en Wynau, Suiza, tiene dos unidades de 2,700 HP., 3.30 m. de diámetro, 48.2 m³/seg., 5.20 m. de caída, velocidad específica de 728 y que dá 107 RPM. Estas unidades pueden trabajar con una caída variable de 2.50 m. teniendo una eficiencia máxima de 89% y una velocidad específica de 728 cuando trabaja con 5.20 M. de caída y una eficiencia de 85% y una velocidad específica de 862 bajo la caída de 2.50 m. Las turbinas fueron construídas por "Atelier de. Construcción Mecaniques", de Vevey.

Viereth.—Esta planta situada en Viereth, Alemania, se compone de una sola unidad de 2,000 HP., de 2,90 m. de diámetro, 5.30 m. de caída y su velocidad específica es de 411. Esta turbina tipo propulsor muy semejante a las turbinas Lawazceck de Lilla-Edet, fué construida por "Newmeyer Company", de Munich, Alemania.

Gavle.—Esta turbina tipo Kaplan está instalada en Gavle, Suecia y es de 400 HP., 1.56 m. de diámetro, 4.20 m. de caída, velocidad específica de 970 y dá 250 RPM.; fué construida por "J. M. Voith and Company", de Heidenheim, Alemania.

Lilla-Edet.—La planta de Lilla Edet en Suecia, se compone de 3 unidades, 2 del tipo Lawazweck y una del tipo Kaplan. Las turbinas Lawazweck son de 10,000 HP., 6 m. de diámetro, 147 M3/seg., 6.13 m. de caída, velocidad específica de 600 y dá 62.5 RPM. La turbina tipo Kaplan es de 11 200 HP., 5.80 de diámetro, 150 M3/seg., 6.13 m. de caída, velocidad específica de 620 y dá 62.5 RPM.

La mariposa de la unidad tipo Kaplan tiene 4 álabes ajustables en movimiento, lo que mejora notablemente el rendimiento con fracciones de la carga.

El diseño de esta planta ha sido completado con un tubo de succión especial para cada tipo de turbina.

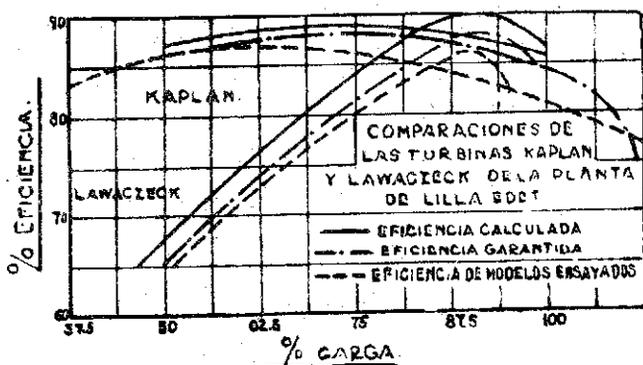


FIGURA 5

La figura 5 muestra las curvas de eficiencia de las turbinas de esta planta y se puede notar el largo período en que la curva de eficiencia del tipo Kaplan se mantiene horizontal, lo que demuestra la gran ventaja de esta turbina para funcionar con una fracción de la carga.

Las turbinas Lawaweck fueron construidas por "A. B. Finshyttan" y la del tipo Kaplan por "VerÉstaden in Kristineham", Suecia.

PLANTAS AMERICANAS

La Gabelle.—Esta planta de la "St. Maurice Power Co.", Canadá, se compone de 4 unidades de 30 000 HP., 18.40 m. de caída, y dan 120 RPM. Esta planta después de un año de operación se encuentra en perfecto estado a excepción del cono de concreto del tubo de succión que ha sido desgastado, este defecto se ha corregido revistiendo con planchas de acero la parte superior del tubo de succión. El tubo de succión es del tipo Moody de expansión.

La operación de estas plantas como las de las que a continuación describiremos, se ha caracterizado por la regularidad, suavidad y ausencia absoluta de vibraciones y otras dificultades. La eficiencia de las turbinas en servicio de todas estas plantas, ha sido siempre superior a la calculada como así mismo a la deducida de los ensayos de sus modelos. La figura 6 muestra la mariposa tipo propulsor de 6 álabes de las turbinas de esta planta.

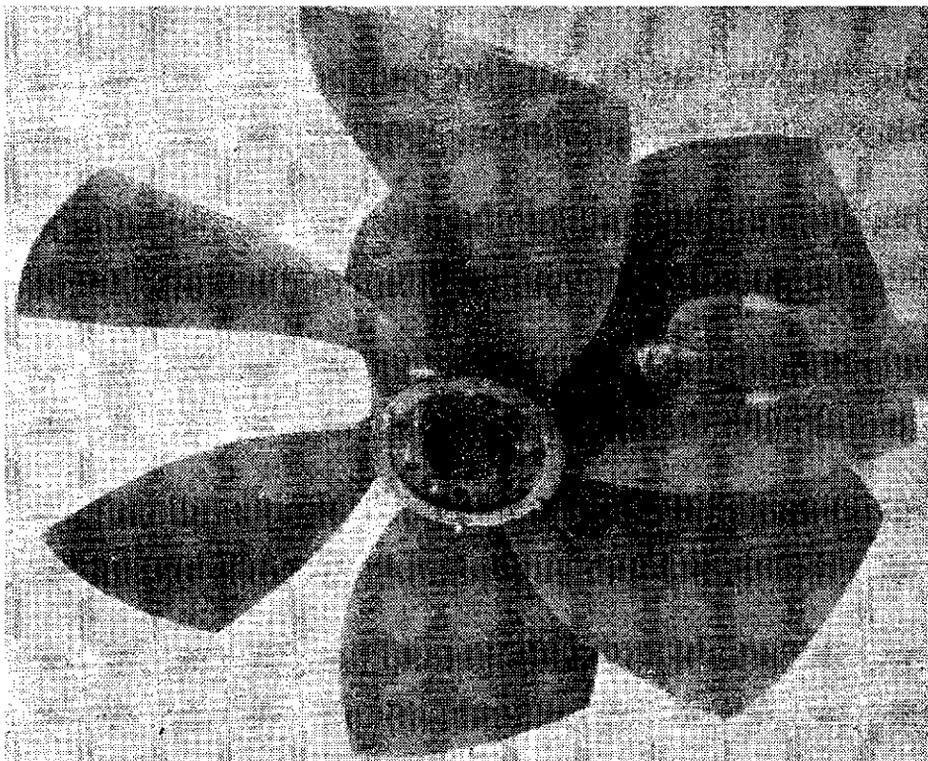


Fig. 6. •Mariposa de las turbinas de «La Gabelle»

Feeder Dam.—Esta planta de la “Moreau Manufacturing Corporation”, situada en el río Hudson, EE. UU., se compone de 5 unidades de 1,500 HP., 5.80 m. de caída, velocidad específica 6.72 y dan 120 RPM. La mariposa del tipo propulsor es de hierro fundido, el tubo de succión del tipo de expansión, es relativamente corto y su parte superior está revestido con planchas de acero.

Estas turbinas fueron construidas por “The Wm. Cramp & Son Ship & Engineering Building Co”.

Anson.—Esta planta de la “Great Northern Paper Co”, situada cerca de Madison, EE. UU., se compone de 4 unidades de 1,500 HP., 6.10 de caída, velocidad específica 610 y dan 150 RPM. La figura 7 muestra la curva de eficiencia de una de las turbinas de esta planta. La mariposa del tipo propulsor es de hierro fundido y el tubo de succión del tipo de expansión. Estas turbinas fueron construidas por “The Wm. Cramp & Son Ship & Engineering Building Co”.

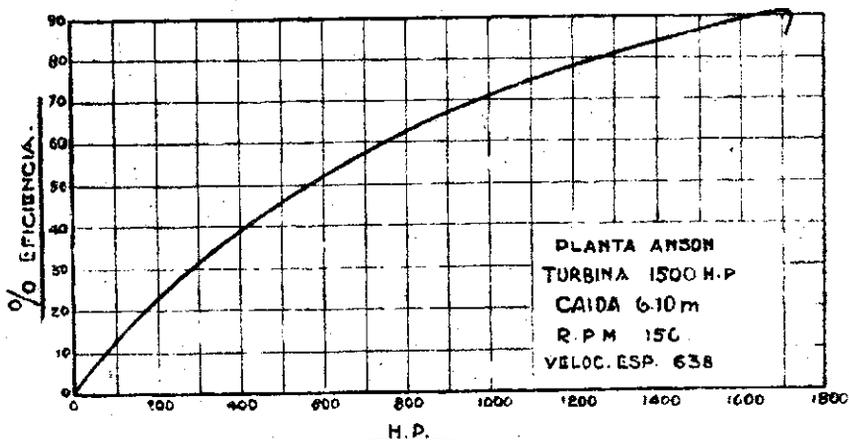


FIGURA 7

Fig. 7

Kapuskasing.—Esta planta de la “Spruce Falls Company”, situada en Kapuskasing, Ontario, Canadá, se compone de 1 unidad del tipo propulsor de 2,500 HP., 9.20 m. de caída, velocidad específica 571 y da 180 RPM. Fué construída por “The Dominion Engineering Works, Ltd.”, Montreal, Canadá.

Otras unidades de este mismo tipo instaladas últimamente en el Canadá, son 2 unidades para la “Howard Smith Paper Co”. de 350 HP., 2.44 m. de caída, velocidad específica 597 y que dan 90 RPM.; 1 unidad para “Dryden Paper Co”., de 1,400 HP., 8.84 m. de caída, velocidad específica 556 y que da 225 RPM. Esta

unidad fué construída por "The Dominion Works", de Montreal, Canadá. 2 unidades para "Southern Canadá Power Co". de 6 000 HP., bajo una caída de 10.36 m., velocidad específica 680 y que dán 138.5 RPM.

CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE LAS TURBINAS DE ALTA VELOCIDAD ESPECÍFICA

Después de haber hecho algunas descripciones ligeras sobre las plantas de bajas caídas más importantes de Europa y América, siguiendo a Lewis Moddy, trataremos algunos puntos teóricos que se relacionan con las turbinas de alta velocidad específica.

VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA CON LA VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE LA TURBINA

Habiendo dado un gran impulso al desarrollo de las turbinas los numerosos ensayos ejecutados con modelos pequeños, tanto en los laboratorios americanos como europeos, es conveniente estudiar la variación de la eficiencia de las turbinas con respecto a la variación de su tamaño, y poder obtener las curvas de eficiencia de una serie homóloga de turbinas después de haber ensayado un modelo pequeño.

Los cálculos con este objeto han sido basados casi siempre en la fórmula de Camerer:

$$e' = 1 - (1 - e) \frac{0.12 + \frac{0.015}{\sqrt{\left(\frac{S}{pD}\right)} D'}}{0.12 + \sqrt{\left(\frac{S}{pD}\right)} D'} \quad (1)$$

En la fórmula (1)

e = eficiencia de una turbina.

e' = eficiencia de una turbina homóloga.

D y D' = sus diámetros respectivos.

s = área de descarga de los álaves de la mariposa.

p = perímetro mojado de esta sección.

s

— es la razón del área de descarga s de los álabes de la mariposa al producto pD

del perímetro mojado por el diámetro de la mariposa, es decir, la razón del radio hidráulico de la sección de los álabes a la salida de la mariposa, al diámetro.

A pesar de que la fórmula de Camerer da buenos resultados con los ensayos actuales no es ampliamente satisfactoria por las razones siguientes:

1.º Exige el cálculo previo del radio hidráulico de los pasajes de agua a través de la mariposa, lo que no puede obtenerse antes de obtenerse el diseño de la turbina.

2.º Esta fórmula es muy complicada en su forma y comprende un número de coeficientes constantes que solamente serán correctamente determinados por su aplicación a numerosos casos de instalaciones similares con el caso que se considere.

3.º Cuando se determina el radio hidráulico es necesario aceptar un valor medio que represente razonablemente el trayecto completo del agua a través de la turbina, lo que es muy dificultoso obtener aunque se tenga su diseño. Camerer evita esta dificultad usando la sección mínima que generalmente se produce a la salida de los álabes.

4.º La fórmula acepta el hecho de que todas las pérdidas son debidas a la fricción y no toma en cuenta que una parte de ellas son producidas por los remolinos, choques y altura de presión debida a la velocidad de descarga.

La causa de lo complicada de la fórmula de Camerer es debida a que está basada en la fórmula de Biel para el cálculo de cañerías.

Moody basándose en el hecho que las pérdidas en una turbina dependen de varios factores y que en la comparación de las eficiencias solamente se pueden obtener resultados aproximados, propone reemplazar la fórmula de Biel por una fórmula sencilla que comprenda solamente las principales variables, una fórmula que de una relación dimensional simple sin incluir los detalles de diseño y con este fin propone la fórmula de Forcheimer.

$$V = K R^{0.7} J^{0.5} \quad J = \frac{V^2}{K^2 R^{1.4}}$$

en la cual

V = velocidad

R = radio hidráulico

J = pendiente hidráulica.

o en su defecto la fórmula reciente de Strickler:

$$J = \frac{V^2}{K^2 R^{4/3}}$$

La fórmula de Strickler se ha comprobado que está muy de acuerdo con un gran número de las medidas efectuadas.

Si y representa la pérdida proporcional de caída en una turbina dada, expresada como una fracción de la caída total, por consiguiente siendo e la eficiencia de la turbina $y = 1 - e$

Si $y = 1 - e$ es la pérdida proporcional de caída en una mariposa, asumamos que en un modelo pequeño una cierta fracción a de esta pérdida, o sea, $a(1 - e)$ queda sin cambiar cuando la mariposa crece homologamente, mientras que la fracción restante $(1 - a)(1 - e)$ es debida a la fricción de la superficie, de modo que la pérdida proporcional en una mariposa grande debe ser:

$$y' = 1 - e' = a(1 - e) + y'_f$$

La fricción de la superficie en una cañería puede ser calculada por la fórmula exponencial

$$h_f = f \frac{L}{R^x} V^m$$

En esta fórmula, excepto para cañerías muy lisas, m puede ser tomado aproximadamente igual a 2, valor correspondiente a cañerías de hierro fundido y x debe ser tomado entre 1,4 (Forcheimer) y 1,167 (Hazen & Williams) ó 1-1/3 (Strickler)

Llamando $x = 1 + p$ en la cual $p = 1/3$, si se usa el valor de Strickler.

$$h_f = f \frac{L}{R} \frac{V^2}{R^p}$$

Expresado como una fracción de la caída total de la turbina

$$J_f = \frac{h_f}{H} = f \frac{L}{R} \frac{V^2}{R^p H}$$

En mariposas homólogas de todos los tamaños, bajo cualquiera caída, cuando son operadas a igual abertura y correspondiente velocidad, v^2 varía directamente con la caída H , de modo que

$$\frac{V^2}{H} = a$$

constante; en todas las mariposas homólogas,

$$\frac{L}{H} = a$$

constante; y como K es proporcional a D , diámetro de la mariposa

$$y = \frac{K}{D^P} = (1-a) (1-e);$$

$$y \quad y' = \frac{K}{D'^P}$$

Por lo tanto, poniendo,

$$K = (1-a) (1-e) D^P$$

Tendremos:

$$y' = (1-e') = a (1-e) + (1-a) (1-e) \frac{D^P}{D'^P}$$

$$o \quad \frac{1-e'}{1-e} = a + (1-a) \left(\frac{D}{D'} \right)^P$$

De la aplicación de esta fórmula a numerosos ensayos, se encuentra que si F se toma igual a 1/3 se encuentra que a , la porción invariable de la pérdida, es una fracción comparativamente pequeña, aproximadamente $\frac{1}{4}$; también se encuentra que la pérdida total puede ser obtenida aproximadamente para valores usuales substituyendo

$$a + (1-a) \left(\frac{D}{D'} \right)^P$$

por la expresión simple

$$\left(\frac{D}{D'}\right)^P$$

en la cual un ligero cambio de P a n es aproximadamente compensado por la caída del término constante. Además esta es una base para deducir que a varía con el tamaño de la mariposa; en las pequeñas mariposas los álabes son comparativamente gruesos, menos afilados y menos exactamente formados, y en consecuencia, tienen una pérdida mayor por remolinos en su descarga y otras partes. Por lo tanto una expresión de la forma

$$\frac{1-e'}{1-e} = \left(\frac{D}{D'}\right)^n$$

puede ser suficiente para todos los propósitos prácticos del cálculo del efecto del tamaño en la eficiencia; en la aplicación a un cierto número de los ensayos actuales se ve que esto es así, variando a muy poco del valor $\frac{1}{4}$.

Por lo tanto, la siguiente fórmula puede ser usada.

$$e' = 1 - (1 - e) \left(\frac{D}{D'}\right)^n \quad (2) \quad \text{o} \quad e' = 1 - (1 - e) \left(\frac{D}{D'}\right)^{\frac{1}{4}}$$

La fórmula (2) propuesta por L. Moody reemplazaría con ventaja a la fórmula (1) de Camerer.

EFFECTO DEL CAMBIO DE FORMA DE LAS TURBINAS EN SU EFICIENCIA Y VELOCIDAD

La discusión precedente se aplica a las turbinas geoméricamente semejantes. Consideremos ahora el cambio de forma y tipo de las turbinas. El cambio es-

pecial que debe considerarse es el de una turbina del tipo Francis a una del tipo propulsor.

Este cambio de tipo envuelve las modificaciones siguientes:

- a) Eliminación del anillo envolvente de la mariposa.
- b) Introducción de un largo espacio de transición entre los álabes guías y la mariposa, en el cual el agua gira de una dirección radial a una dirección en parte o completamente axial.
- c) La reducción de las superficies de los álabes de modo que cada uno sobre-cubre a otro ligeramente o no lo sobre-cubre, dejando un espacio libre entre ellos.
- d) Una reducción en el número de los álabes.
- e) El uso del tubo de succión simétrico alrededor del eje de la turbina, que es capaz de convertir eficientemente en caída útil la altura de velocidad de las componentes meridiana y tangencial de la velocidad de descarga de la mariposa, que permite que estas dos componentes sean relativamente grandes.

El efecto de cada uno de los cambios mencionados es llevar a la mariposa a operar a una velocidad mayor bajo una caída dada, por la libertad de usar una velocidad relativa mayor y una inclinación también mayor de la velocidad absoluta de la descarga de la mariposa.

La razón de la eliminación del anillo envolvente es simple, con las velocidades y diámetros usados, la velocidad relativa del agua en contacto con el anillo en movimiento llega a ser considerablemente mayor que su velocidad absoluta a lo largo de la superficie estacionaria de la pared envolvente, de modo que hay una superficie de resistencia menor, en la superficie sumergida del anillo, cuando es estacionaria que cuando rota, y además por el reemplazo del anillo rotatorio por una pared estacionaria se elimina la resistencia a la fricción de su superficie exterior.

El efecto del espacio de transición es reducir la velocidad relativa entre el agua y los álabes en todas las secciones, excepto en el extremo de los álabes; en este extremo es aumentado, sin embargo como la orilla de la entrada de los álabes es llevada muy cerca del eje, la velocidad relativa en las proximidades del eje principia a crecer nuevamente, tendiendo el agua en este punto a rotar más ligero que la mariposa, en resumen, la fricción debida al recorrido del agua a lo largo de la parte estacionaria descuenta en parte el decrecimiento de la fricción de los álabes. Esta consideración es una de las cuales ha inducido a Moody a proyectar su tipo diagonal, mariposa intermediaria entre el tipo radial y el absolutamente axial.

En la misma forma una reducción excesiva de la superficie de los álabes, si por una parte reduce la fricción de superficie, origina una imperfecta orientación de la

corriente y da origen a otras pérdidas que balancean las ventajas obtenidas por esta reducción de superficie.

Se ha encontrado además que si la reducción de la superficie de los álabes se lleva muy lejos de desmejorar la estabilidad de funcionamiento, por la producción de ondas, que hacen muy inestable la corriente, lo que baja la eficiencia y reduce el campo de aplicación de las turbinas tipo propulsor.

Para investigar el efecto de la disminución del número de los álabes, supongamos una serie de mariposas en las cuales se usa una misma razón de área de los álabes al área del disco, mientras unas tienen muchos álabes y cortos y angostos pasajes entre ellos, otras tienen pocos álabes y largos y anchos pasajes de agua, siendo la sección de álabe geoméricamente similar en todo y teniendo la misma razón de largo y ancho de vías de agua. Siendo la mariposa sin anillo exterior, el perímetro mojado de los pasajes puede ser tomado como igual al doble del largo de los álabes más la superficie del núcleo, y si la superficie del núcleo se desprecia y se compensa aproximadamente tomando el largo de los álabes desde el eje, el perímetro mojado puede ser tomado igual a $2r$, siendo r el radio tipo de los álabes medido en su superficie cónica.

El área de los pasajes de la mariposa es:

$$\frac{\pi \times 2 \pi \frac{r}{2} \text{sen.} \beta}{n}$$

siendo: B la inclinación de los álabes

n = número de álabes.

En consecuencia el radio hidráulico de los pasajes de la mariposa es:

$$\frac{\pi r^2 \text{sen} \beta}{2 n r} = \frac{\pi r \text{sen} \beta}{2 n}$$

Luego la pérdida de caída por la fricción de los álabes variará inversamente al radio hidráulico elevado a x . Usando la fórmula de Strickler $x = 1,3$, la razón de la pérdida por fricción en los álabes de dos mariposas será:

$$\left(\frac{\frac{\pi r \text{sen} \beta}{2n}}{\frac{\pi r' \text{sen} \beta}{2n'}} \right) \times \left(\frac{r}{r'} \times \frac{n'}{n} \right)^{1/3}$$

La fórmula muestra que en una serie de mariposas de esta clase, la pérdida por fricción en los álabes varía directamente con la raíz cúbica del número de álabes e inversamente a la raíz cúbica de los radios. Por ejemplo, comparando una mariposa de 16 álabes con una de cuatro álabes, la última debe tener $\left(\frac{a}{16}\right)^{1/3} = 0.63$

o sea, el 63% de la pérdida de fricción en los álabes de la primera, o una reducción de 37% de esta pérdida.

No debe olvidarse que esto no significa que se tomen los álabes del mismo tamaño, sino que así como se reduce su número, se agranden para obtener la misma área total de álabes.

Como se ve, al reducir el número de álabes, se reduce esta pérdida y en consecuencia es conveniente llevar esta reducción a un máximo, pero por otro lado la reducción del número de álabes incrementa el largo axial del núcleo y de los álabes, aleja el centro de gravedad de la mariposa con respecto al apoyo, incrementa el largo de la cubierta envolvente y aumenta la pérdida por fricción en esta envoltura.