

DEFINICIÓN DE VARIABLES EMPLEADAS

A:	Área de la sección transversal del flujo.
A_p, A_m :	Áreas hidráulicas del prototipo y del modelo, respectivamente.
b_1, b_2 :	Anchos del álabe en los puntos 1 y 2, respectivamente.
c_1, c_2 :	Velocidad absoluta de una partícula de fluido, a la entrada y salida del álabe, respectivamente.
c_{1m}, c_{2m} :	Componente meridional de la velocidad absoluta del fluido, a la entrada y a la salida del álabe, respectivamente.
c_{1u}, c_{2u} :	Componente tangencial o periférica de la velocidad absoluta del fluido, a la entrada y a la salida del álabe, respectivamente.
c_{2up}, c_{2um} :	Componente tangencial o periférica de la velocidad absoluta del fluido, a la salida del rodete en el prototipo y en el modelo, respectivamente.
D_1, D_2 :	Diámetro del rodete en los puntos 1 y 2, respectivamente.
d_e :	Diámetro del eje.
dQ:	Caudal diferencial que fluye a través de un hilo de corriente.
dF:	Diferencial de fuerza debido al cambio en la cantidad de movimiento.
dM:	Diferencial de momento total comunicado al fluido.
d:	Diámetro de la garganta del venturímetro.
D:	Diámetro de la tubería.
D_p, D_m :	Diámetro de los impulsores de las bombas prototipo y modelo, respectivamente.

E_1, E_2 :	Energía a la entrada y salida del órgano intercambiador de energía.
e :	Sección de entrada a la bomba.
g :	Aceleración de la gravedad.
H :	Altura útil nominal que puede suministrar la bomba.
H_m, H_p :	Altura útil nominal del modelo y del prototipo, respectivamente.
H_e :	Energía (altura) total a la entrada de la bomba.
H_d :	Altura dinámica imprimida por el rodete.
H_u :	Altura útil o efectiva de una bomba.
H_s :	Altura de suspensión, de aspiración o de succión de la bomba.
H_t :	Energía (altura) teórica comunicada al fluido. En todas las turbomáquinas generadoras, es la energía (altura) intercambiada en el rodete.
H_{int} :	Pérdidas en el interior de la bomba. Pérdidas de altura total hidráulica, expresadas en columna de líquido.
H_{ext} :	Pérdidas exteriores a la bomba.
h_{fa}, h_{fi} :	Pérdidas de carga por fricción en las tuberías de aspiración e impulsión, respectivamente.
h_L :	Pérdidas de carga locales.
h_{1-2} :	Pérdidas de carga entre los puntos 1 y 2 (entrada y garganta, respectivamente) de un venturímetro.
H_{ed} :	Altura de aspiración disponible a la entrada de la bomba ($NPSH_{disp.}$)
$H_{ed\ mín}$:	Altura de aspiración necesaria para el correcto funcionamiento de la máquina ($NPSH_{req.}$)
$H_s\ máx$:	Altura de succión máxima de la bomba, con respecto al nivel superficial del agua en el tanque de aspiración.

h_{A-e} :	Pérdida de carga en la tubería de aspiración.
H_{tm}, H_{tp} :	Energía (altura) teórica aprovechada por el rodete, en el modelo y en el prototipo, respectivamente.
k_{1p} :	$(\pi D_1 / 60)_p$.
k_{1m} :	$(\pi D_1 / 60)_m$.
k_{2p} :	$(\pi D_2 / 60)_p$.
k_{2m} :	$(\pi D_2 / 60)_m$.
l_1, l_2 :	Brazos del momento de la cantidad de movimiento, en los puntos 1 y 2 del álabe, respectivamente.
m c.a.:	Metros de columna de agua.
M:	Momento total comunicado al fluido o momento hidráulico. Momento del par de reacción del motor.
M_s, M_e :	Lecturas de los manómetros colocados a la salida y a la entrada de la bomba, respectivamente.
n:	Número de revoluciones por minuto.
NPSH:	Altura de succión neta positiva (del inglés Net Positive Suction Head).
$NPSH_{disp.}$:	Altura de succión neta positiva disponible.
$NPSH_{neces.}$:	Altura de succión neta positiva necesaria para el correcto funcionamiento de una bomba.
$NPSH_{req.}$:	Altura de succión neta positiva requerida para el correcto funcionamiento de una bomba. Es sinónimo de la variable inmediatamente anterior.
n_s :	Número específico de revoluciones de la bomba.
n_p, n_m :	Número de revoluciones por unidad de tiempo del prototipo y del modelo, respectivamente.

P:	Potencia nominal de la bomba.
p_e, p_s :	Presión del flujo en las secciones de entrada y de salida de la bomba, respectivamente.
p_1, p_2 :	Presión del flujo en las secciones 1 y 2, respectivamente.
P_h, P_v, P_m :	Pérdidas de potencia hidráulica, volumétrica y mecánica, respectivamente.
P_a :	Potencia de accionamiento o absorbida o al freno o en el eje de la bomba.
P_{red} :	Potencia absorbida en la red.
P_i :	Potencia interna de la bomba.
P_u :	Potencia útil de la bomba.
p:	Presión.
p_A :	Presión absoluta en la superficie libre del líquido, en el depósito de aspiración.
p_v :	Presión absoluta de vapor del líquido bombeado, a la temperatura de bombeo. Se obtiene de tablas termodinámicas.
P_p, P_m :	Potencias útiles de las bombas prototipo y modelo, respectivamente.
Q:	Caudal neto impulsado por la bomba.
q_e :	Pérdidas exteriores de caudal.
q_i :	Pérdidas interiores de caudal.
Q_p, Q_m :	Caudal en el prototipo y en el modelo, respectivamente.
r_1, r_2 :	Radios del rodete en los puntos 1 y 2 del álabe, respectivamente.
R:	Número de Reynolds del flujo a través de la bomba.
R_m, R_p :	Número de Reynolds de los flujos de las bombas modelo y prototipo, respectivamente.

s:	Sección de salida de la bomba.
Torr:	Unidad de presión equivalente a 1 mm de columna de mercurio (1 mm Hg).
u_1, u_2 :	Velocidad periférica o tangencial del rodete, a la entrada y a la salida del álabe, respectivamente.
u_p, u_m :	Velocidad periférica o tangencial del modelo y prototipo, respectivamente.
u_{2p}, u_{2m} :	Velocidad periférica o tangencial del rodete, a la entrada y a la salida del álabe, en el prototipo y en el modelo, respectivamente.
v_p, v_m :	Velocidad del flujo en el prototipo y en el modelo, respectivamente.
w_1, w_2 :	Velocidad relativa de una partícula de fluido, a la entrada y a la salida del álabe, respectivamente.
z_1, z_2 :	Altura de posición de los puntos de entrada (1) y de salida (2) del álabe, respectivamente.
z_e, z_s :	Altura de posición de los puntos de entrada (e) y de salida (s) de la bomba, respectivamente.
z_A :	Altura de posición en la superficie libre del agua, en el tanque de aspiración.

VARIABLES DEL ALFABETO GRIEGO

α :	Coefficiente de Coriolis. Coeficiente de corrección por energía cinética.
α_1, α_2 :	Ángulo formado por los vectores de velocidad c_1 y u_1 , y los vectores c_2 y u_2 , respectivamente.
β_1, β_2 :	Ángulo formado por los vectores de velocidad w_1 y $(-u_1)$, y los vectores w_2 y $(-u_2)$, respectivamente.
β_1' :	Ángulo suplementario de β_1 , formado por el vector de velocidad w_1 y la prolongación del vector u_1 . ($\beta_1 + \beta_1' = 180^\circ$).
γ :	Peso específico del fluido.
γ_p, γ_m :	Peso específico del fluido, en el prototipo y en el modelo, respectivamente.
Δp :	Incremento de presión.
ΔH :	Cambio de energía entre un punto a la entrada y otro punto a la salida del órgano intercambiador de energía, en una máquina hidráulica.
Δh :	Caída de altura de presión en el interior de la bomba, cuyo valor es suministrado por el fabricante. (Es el mismo $NPSH_{req.}$)
δ :	Densidad relativa del fluido.
η :	Eficiencia.
η_m, η_h, η_v :	Eficiencias mecánica, hidráulica y volumétrica de la bomba, respectivamente.
η_{total} :	Eficiencia total.

η_{motor} :	Eficiencia del motor eléctrico.
$\eta_{1 \text{ total}}, \eta_{2 \text{ total}}$::	Eficiencia total del prototipo y del modelo, respectivamente.
$\eta_{h \text{ m}}, \eta_{h \text{ p}}$::	Eficiencia hidráulica en el modelo y en el prototipo, respectivamente
$\eta_{p \text{ total}}, \eta_{m \text{ total}}$::	Eficiencia hidráulica total en el prototipo y modelo, respectivamente.
λ :	Escala geométrica del modelo.
$\nu_{\text{m}}, \nu_{\text{p}}$:	Viscosidad cinemática del fluido en el modelo y en el prototipo, respectivamente.
ρ :	Densidad del fluido.
σ :	Coefficiente de cavitación, o coeficiente de Thoma.
υ :	Volumen específico del fluido.
ω :	Velocidad de rotación (angular) del rodete (rad/s.).

LISTA DE FIGURAS

	Página.
Figura No. 1.1 Bombas gravimétricas y de desplazamiento positivo.....	5
Figura No. 1.2 Tipos de dirección del flujo en turbomáquinas hidráulicas	6
Figura No. 1.3 Cuadro de clasificación de las máquinas hidráulicas	7
Figura No. 2.1 Cortes meridional y transversal del rodete de una bomba rotodinámica...	9
Figura No. 2.2 Triángulos de velocidades a la entrada y a la salida del álabe	14
Figura No. 3.1 Dirección del flujo en bombas hidráulicas rotodinámicas	18
Figura No. 3.2 Bombas rotodinámicas de succión simple y de doble succión.....	19
Figura No. 3.3 Bomba múltiple de cinco etapas.....	20
Figura No. 3.4 Diferentes tipos de impulsores de bombas rotodinámicas.....	22
Figura No. 3.5 Tipos de carcasa de bombas	23
Figura No. 3.6 Tipos de voluta de bombas	24
Figura No. 3.7 Rodetes abiertos inatascables	25
Figura No. 3.8 Elementos constitutivos de una bomba rotodinámica	26
Figura No. 3.9 Instalación típica de una bomba	27
Figura No. 3.10 Corte transversal a través del rodete de una bomba rotodinámica	28
Figura No. 3.11 Triángulo de velocidades a la entrada y a la salida del álabe del rodete .	29
Figura No. 3.12 Curvas características teóricas, $H_{t,\infty}$ vs. Q , en bombas rotodinámicas	31
Figura No. 3.13 Curva teórica, $H_{t,\infty}$ vs. Q_r , en rodetes con $\beta_2 < 90^\circ$	33
Figura No. 3.14 Ilustración de lo que sucedería si el rodete girara en sentido contrario al previsto	34
Figura No. 3.15 Pérdidas de potencia volumétricas de una bomba	38
Figura No. 3.16 Pérdidas de potencia mecánicas por rozamiento	38

	Página.
Figura No. 3.17 Relación entre las distintas potencias y pérdidas potencia de una bomba rotodinámica	41
Figura No. 3.18 Curvas teóricas, $H_{t,\infty}$ vs. Q_r , y $H_{t,z}$ vs. Q_r , de una bomba rotodinámica ..	45
Figura No. 3.19 Sección de entrada y salida, y sus respectivos medidores de presión, instalados en una bomba rotodinámica.....	46
Figura No. 3.20 Esquema ilustrativo de las pérdidas hidráulicas por choque	47
Figura No. 3.21 Curvas de alturas manométricas teóricas y reales, y de pérdidas hidráulicas, en función del caudal impulsado por el rodete	49
Figura No. 3.22 Esquema ilustrativo de las pérdidas volumétricas de una bomba rotodinámica	50
Figura No. 3.23 Curva característica H_B vs. Q de una bomba rotodinámica, obtenida a partir de ensayos de bombeo	51
Figura No. 3.24 Curva característica, P_a vs. Q , de una bomba rotodinámica	53
Figura No. 4.1 Evaporación y presión de vapor de los líquidos	55
Figura No. 4.2 Escalas de presiones absoluta y relativa	56
Figura No. 4.3 Caída de presión en la garganta de un venturímetro	57
Figura No. 4.4 Cavitación por depresión excesiva en la entrada de una bomba	57
Figura No. 4.5 Representación gráfica del $NPSH_{disponible}$	63
Figura No. 6.1 Esquema de un banco de pruebas de bombas rotodinámicas	76
Figura No. 6.2 Tabla de valores de las características de la bomba ensayada.....	79
Figura No. 6.3 Curva motriz de la bomba elegida.....	81
Figura No. 6.4 Curvas características de distintos tipos de bombas	82
Figura No. 6.5 Curvas características de bombas de diferentes tamaños	85
Figura No. 6.6 Curvas características y colinas de isoeficiencia de bombas rotodinámicas. Adaptadas del catálogo comercial de la Firma IHM	86

	Página.
Figura No. 7.1	Esquema de una instalación de bombeo elemental típica..... 88
Figura No. 7.2	Determinación gráfica del punto de funcionamiento de una instalación de bombeo elemental..... 91
Figura No. 7.3	Acoplamiento de bombas en serie 93
Figura No. 7.4	Acoplamiento de bombas en paralelo..... 93
Figura No. 7.5	Curva motriz de una bomba centrífuga frente a la curva resistente de la instalación, para diferentes alturas estáticas 95
Figura No. 7.6	Curva característica H vs. Q de dos bombas diferentes en serie 96
Figura No. 7.7	Curva característica H vs. Q de bombas multietapas 98
Figura No. 7.8	Acoplamiento de dos bombas diferentes acopladas en paralelo..... 100
Figura No. 7.9	Acoplamiento de dos bombas idénticas en paralelo..... 102
Figura No. 7.10	Acoplamiento de dos bombas distintas en paralelo, con igual ordenada H, para $Q = 0$ 103
Figura No. 7.11	Curvas características de dos bombas distintas acopladas en paralelo.. 104
Figura No. 8.1	Esquema ilustrativo del funcionamiento de una bomba rotodinámica, operando con succión positiva y sin previo cebado 105
Figura No. 8.2	Diversos esquemas de cebado de una bomba rotodinámica..... 109
Figura No. 9.1	Boca de aspiración en forma de cono convergente divergente. Tomada de la Referencias 2 y 9..... 115
Figura No. 9.2	Colector de aspiración para alimentación de dos o más bombas en paralelo: a) diseño en ángulo (errado); b) diseño en ángulo (acertado). Tomada de la Referencia 9. 116
Figura No. 9.3	Diversas causas de entrada de aire al conducto de aspiración de la bomba. Tomada de la Referencia 2. 118
Figura No. 9.4	Formación de flujo rotacional, debido a alta turbulencia, cerca de la tubería de aspiración de una bomba. Adaptada de la Referencia 2. 119

Figura No. 9.5	Estela generada por el alineamiento de las tuberías de aspiración. Adaptada de la Referencia 2.	119
Figura No. 9.6	Dimensiones y sumergencia mínima recomendadas para la boca de aspiración. Adaptada de la Referencia 2.	120
Figura No. 9.7	Dimensiones recomendables para sumergencia mínima, distancia al fondo de la cámara de aspiración y reducción de zonas muertas. Adaptada de la Referencia 2.	121
Figura No. 9.8	Dimensiones recomendables para cámaras de aspiración, en casos de varias bombas dispuestas transversalmente o con compartimentos individuales. Adaptada de la Referencia 2.	121

BIBLIOGRAFÍA

1. ABREU, José M., GUARGA, Rafael, IZQUIERDO, Joaquín (1995). Transitorios y Oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión. España, Unidad Docente Mecánica de Fluidos (U.P.V.). 1ª. Ed.
2. CABRERA, Enrique, ESPERT, Vicent, GARCÍA-SERRA, Jorge, MARTÍNEZ, Fernando (1996). Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. España, Unidad Docente Mecánica de Fluidos (U.P.V.). 2ª. Ed.
3. HICKS, Tyler G (1980). Bombas, su Selección y Aplicación. México, Compañía Editorial Continental S.A. 3ª. Ed.
4. INDUSTRIAS HIDROMECÁNICAS Ltda. (IHM) (1986). Bombas Compresores, construcción. Bogotá, IHM.
5. KARASSIK, Igor J. y otros. (1976). Manual de Bombas. México, Editorial Mc. Graw Hill. 1ª. Ed.
6. MARBELLO PÉREZ, Ramiro (1989). Máquinas Hidráulicas: Bombas. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil.
7. MATAIX, Claudio (1982). Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. México, Editorial HARLA, 2ª. Ed.
8. QUIROS MORALES, Luís Fernando (1988). Investigación sobre bombas y sistemas de bombeo aplicada al estudio de las bombas Palenque-Cucaracho y Volador-Robledo, de Empresas Públicas de Medellín. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Tecnología Mecánica. Trabajo de Grado.
9. STERLING FLUID SYSTEMS GROUP (2003). Basic Principles for the Design of Centrifugal Pump Installations. STERLING FLUID SYSTEMS B.V. 7ª. Ed.

10. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Centro de Estudios Técnicos e Investigaciones Hidráulicas (CETIH) (1984). Seminario sobre Bombas y Estaciones de Bombeo. Bogotá, Universidad de los Andes. 1ª. Ed. Vol. I y II.
11. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (1986). Apuntes para un curso Intensivo sobre Bombas y Estaciones de Bombeo. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín. 1ª. Ed. Vol.I y II.
12. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Organización Panamericana de la Salud, Instituto Nacional de Fomento Municipal (1970). Bombas y Estaciones de Bombeo. Medellín, Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia. 1ª. Ed.
13. WALSKI, T. M., CHASE, D. V., SAVIC, D. A. (2001). Water Distribution Modeling. HAESTAD METHODS PRESS USA. 1ª. Ed.