

SEMEJANZA EN TURBOMÁQUINAS

Prof. Jesús DE ANDRADE

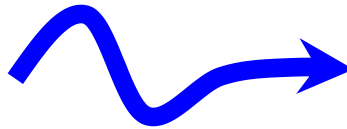
Prof. Miguel ASUAJE

Febrero 2010

Análisis de Desempeño de las Turbomáquinas

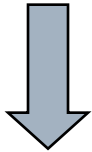
Métodos de Análisis

¿Cuál es el Problema?



Se quiere predecir el comportamiento de una turbomáquina: bomba, compresor o cualquier otro tipo

¿Qué conocemos?



Características de Operación

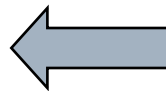
$$\dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad \text{ó} \quad Q \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$H \quad \text{ó} \quad \frac{P_2}{P_1} \quad \left[\frac{J}{dim} \right]$$

$$N [rpm]$$

+

Geometría



Métodos Experimentales

Métodos Numéricos:

Métodos 1D

Métodos 2D

Métodos Q-3D

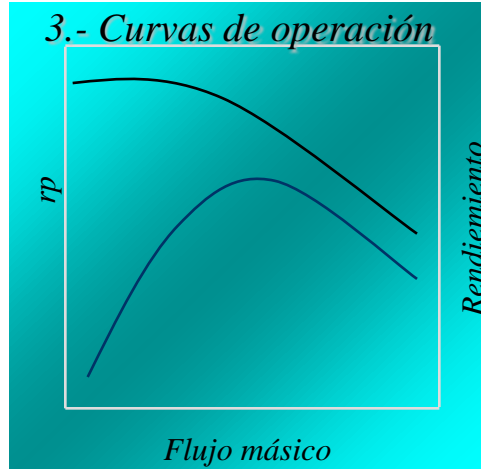
Métodos 3D

Métodos Experimentales ...

1.- Construcción de un modelo



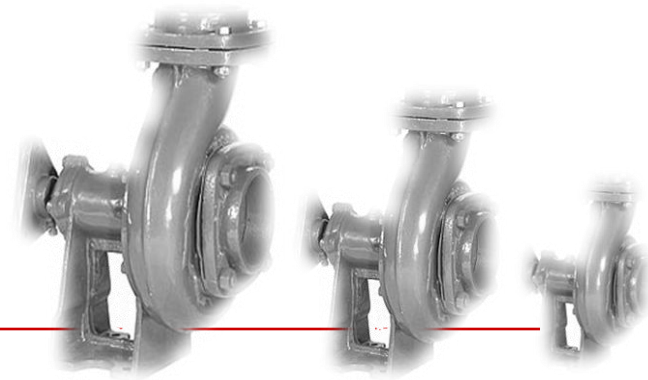
2.- Ensayos sobre un banco de prueba



- *Curvas de Operación*
- *Correlaciones Experimentales*
- *Familias de Máquinas*



Algunos Datos: Longitud del ducto de entrada, Tamaño del compresor, Longitud del ducto de salida. Características del compresor



Semejanza

Para que exista semejanza entre modelo y prototipo se debe cumplir:

- **Similitud geométrica:**

$$\frac{L_p}{L_m} = \lambda \quad \frac{A_p}{A_m} = \lambda^2 \quad \frac{Vol_p}{Vol_m} = \lambda^3 \quad \lambda \text{ es la escala}$$

- **Similitud cinemática:** implica que la relación entre las velocidades para puntos homólogos del modelo y del prototipo es constante y en TBMH que los triángulos de velocidad sean semejantes.

$$\frac{\overline{V_{1p}}}{\overline{V_{1m}}} = \frac{\overline{V_{2p}}}{\overline{V_{2m}}} = \dots = cte$$

- **Similitud dinámica:** Que la razón de fuerzas y presiones dinámicas en puntos correspondientes sea una constante.

$$\frac{\overline{F_{1p}}}{\overline{F_{1m}}} = \frac{\overline{F_{2p}}}{\overline{F_{2m}}} = \dots = cte$$

Semejanza en Turbomáquinas. Números Adimensionales

Basados en el principio de similitud. (Pi-Buckingham)

9 variables y 3 dimensiones básicas

$n = 9 - 3 = 6$ Números adimensionales

$$\pi_1 = \frac{\rho V L}{\mu} = \text{Re}$$

Número de Reynolds $\sim \frac{F_{\text{inercia}}}{F_{\text{viscosas}}}$

$$\pi_2 = \frac{V^2}{gL} \sim Fr^2$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Número de Froude $\sim \frac{F_{\text{inercia}}}{F_{\text{gravedad}}}$

$$\pi_3 = \frac{p}{\rho V^2} = Eu$$

Número de Euler $\sim \frac{F_{\text{presión}}}{F_{\text{inercia}}}$

Semejanza en Turbomáquinas.

Números Adimensionales

$$\pi_4 = \frac{Vt}{L} = Sh \quad \text{Número de Strouhal} \quad \sim \quad \text{Velocidades o Condición Cinemática}$$

$$\pi_5 = \frac{V}{a} = Ma \quad \text{Número de Mach} \quad \sim \quad \frac{F_{inercia}}{F_{elásticas}}$$

$$\pi_6 = V \left(\frac{\rho L}{\sigma} \right)^{1/2} = We \quad \text{Número de Weber} \quad \sim \quad \frac{F_{inercia}}{F_{tensiónsuperficial}}$$

Tipos de Similitud

Similitud Completa:

En construcción

Similitud Parcial:



Limites de la Similitud?

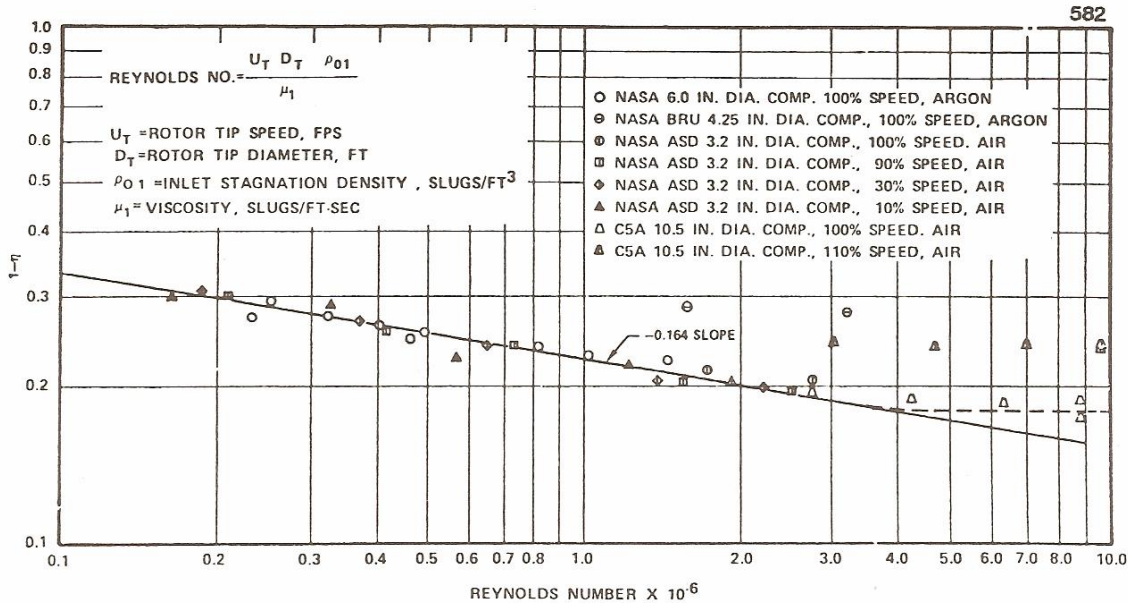


Figure 1.63. Compilation of centrifugal compressor efficiency decrement as a function of Reynolds number (Pampreen 1973, reprinted with permission of ASME).

El Reynolds no puedes ser Escalado

$$Re \uparrow \Rightarrow \eta \uparrow$$

Además:

En el estudio de los modelos
 Los valores no son "exactos"
 por efectos como:

- ✓ Juegos
- ✓ Acabados superficiales
- ✓ Espesores
- ✓ Etc ...

Parámetros de similitud en TM

Partiendo del principio de Similitud Parcial:

En construcción



Otra forma de ver los Principales Números Adimensionales en la TM

<i>Parámetro</i>	<i>Formulación</i>
Coeficiente de Flujo	$\Pi_1 = \frac{Q}{ND^3} = \frac{m}{ND^3} \propto \frac{m}{ND^2} \quad o \quad \phi = \frac{Q}{UA} = \frac{C_m}{U}$
Coeficiente de Carga	$\Pi_2 = \frac{gH}{N^2 D^2} \quad o \quad \frac{\Delta p}{\rho N^2 D^2} \quad o \quad \psi = \frac{\Delta h_o}{U^2}$
Coeficiente de Potencia	$\Pi_3 = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad or \quad \frac{\Delta h_o}{h_{o1}}$
Número de Reynolds	$\Pi_4 = \frac{\rho ND^2}{\mu} \quad or \quad Re = \frac{\rho ND}{\mu}$
Número de Mach o Relación de Velocidades	$\Pi_5 = \frac{ND}{a} \quad or \quad Ma = \frac{U}{a_{oo}}$

Coeficientes Característicos de uso común

Adimensionales:

Velocidad Específico de Giro referida al Caudal:

$$n_q^* = \frac{N \sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}}$$

Diámetro Específico:

$$D_s^* = \frac{D(gH)^{1/4}}{\sqrt{Q}}$$

Coeficientes Característicos de uso común

Dimensionales:

Diámetro específico:

$$D_s = \frac{D(H)^{1/4}}{\sqrt{Q}}$$

Velocidad específica de giro referida al caudal:

$$n_q = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Velocidad específica de giro referida a la potencia:

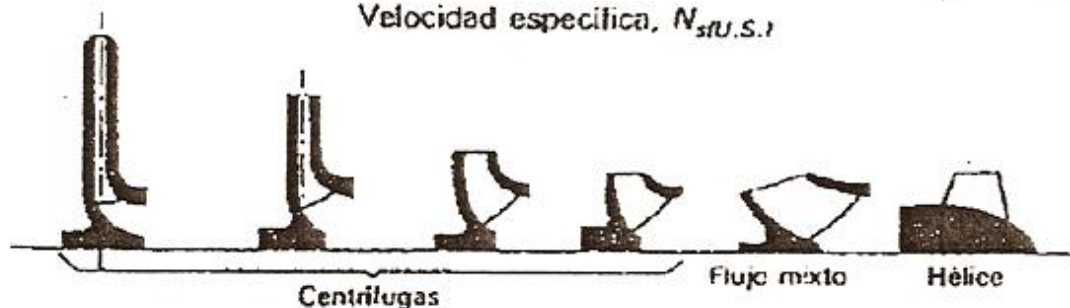
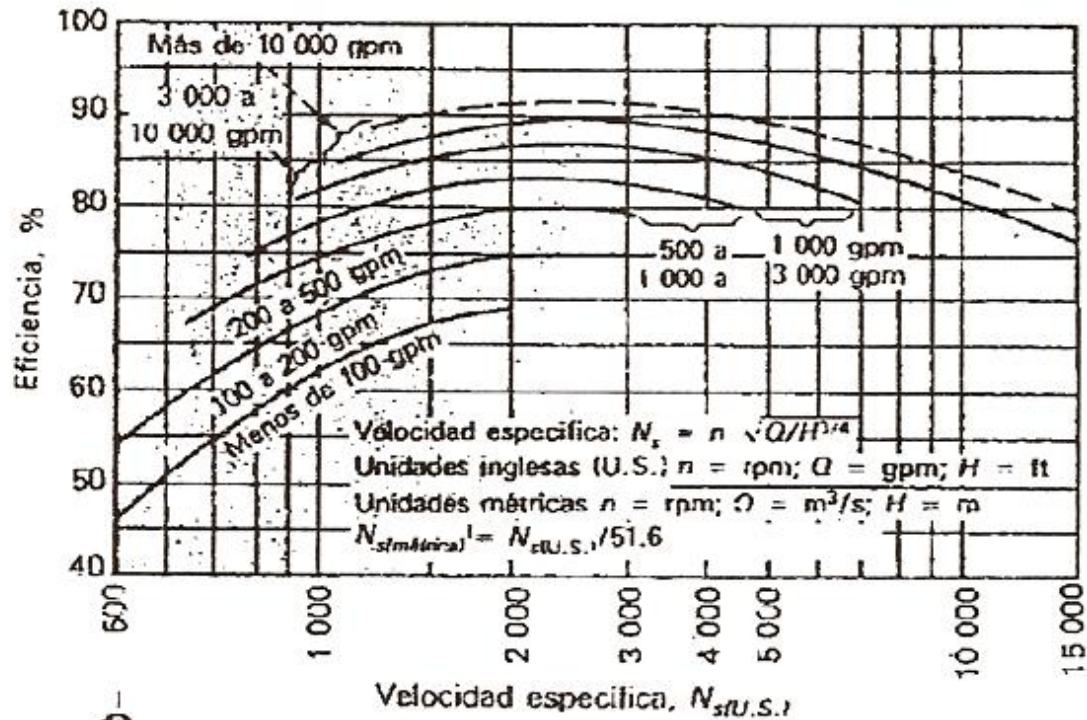
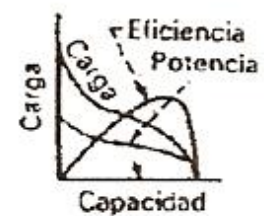
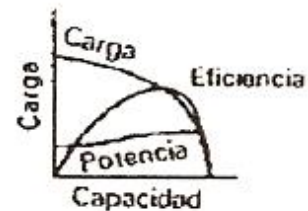
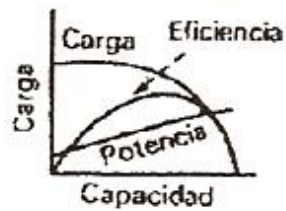
$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{P_m}}{H^{5/4}}$$

Coeficientes Característicos de uso común

Para el cálculo de los coeficientes antes mencionados se emplean las siguientes unidades:

Sistema Métrico	Sistema Inglés
[n] = RPM	[n] = RPM
[Q] = m ³ /s	[Q] = GPM
[H] = m	[H] = pies
[P_m] = CV	[P_m] = HP
[D] = m	[D] = plg

Relaciones de Velocidad Específica de bombas Rotodinámicas



Velocidad específica para distintos tamaños de rodete

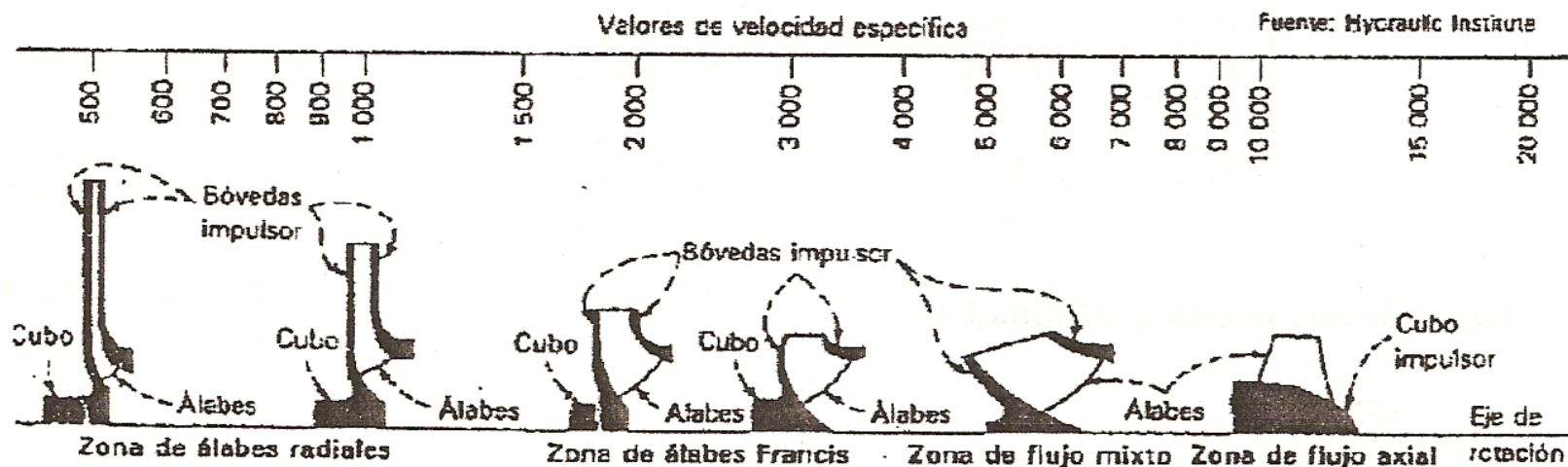


Figura 24 - Velocidad específica para distintos diseños de rodete.

Pérdidas en función del nq

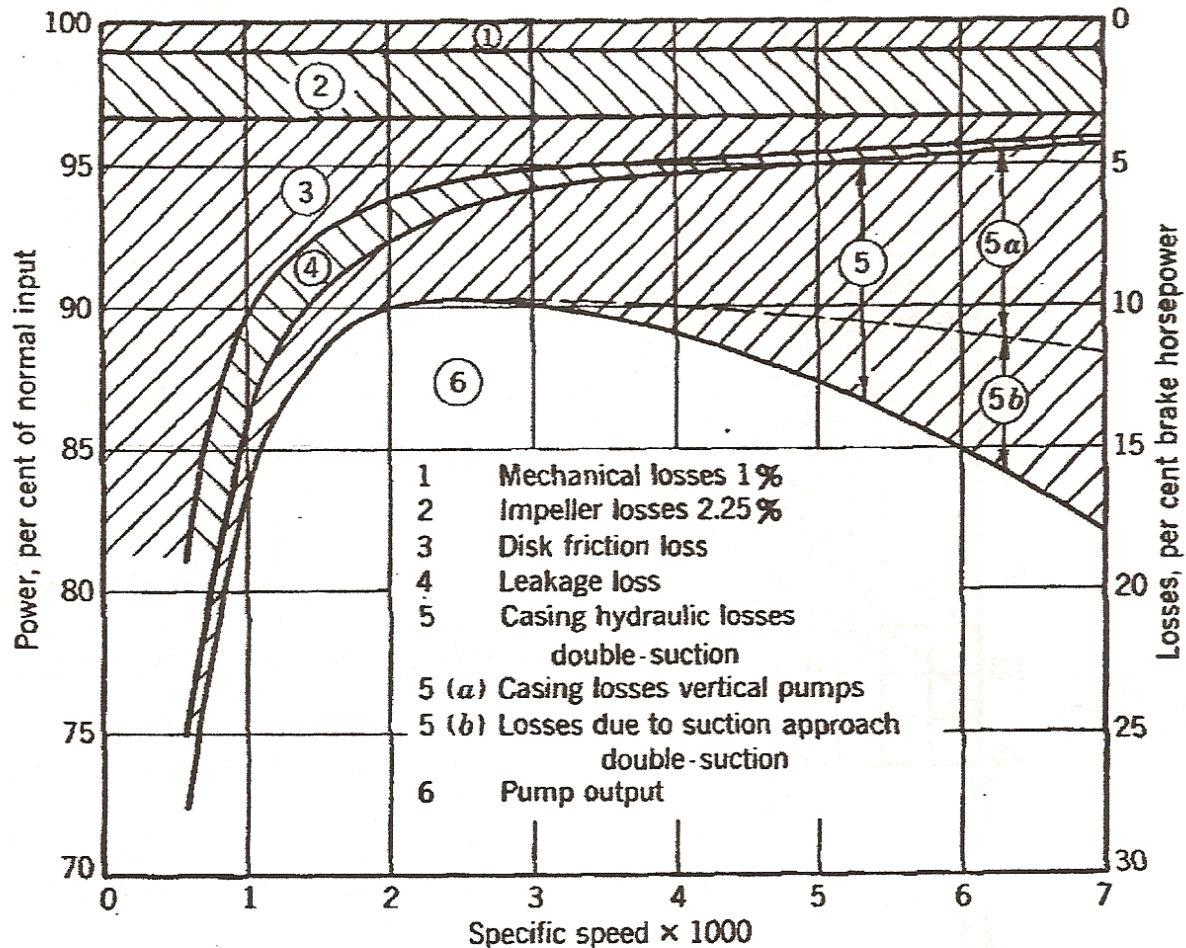
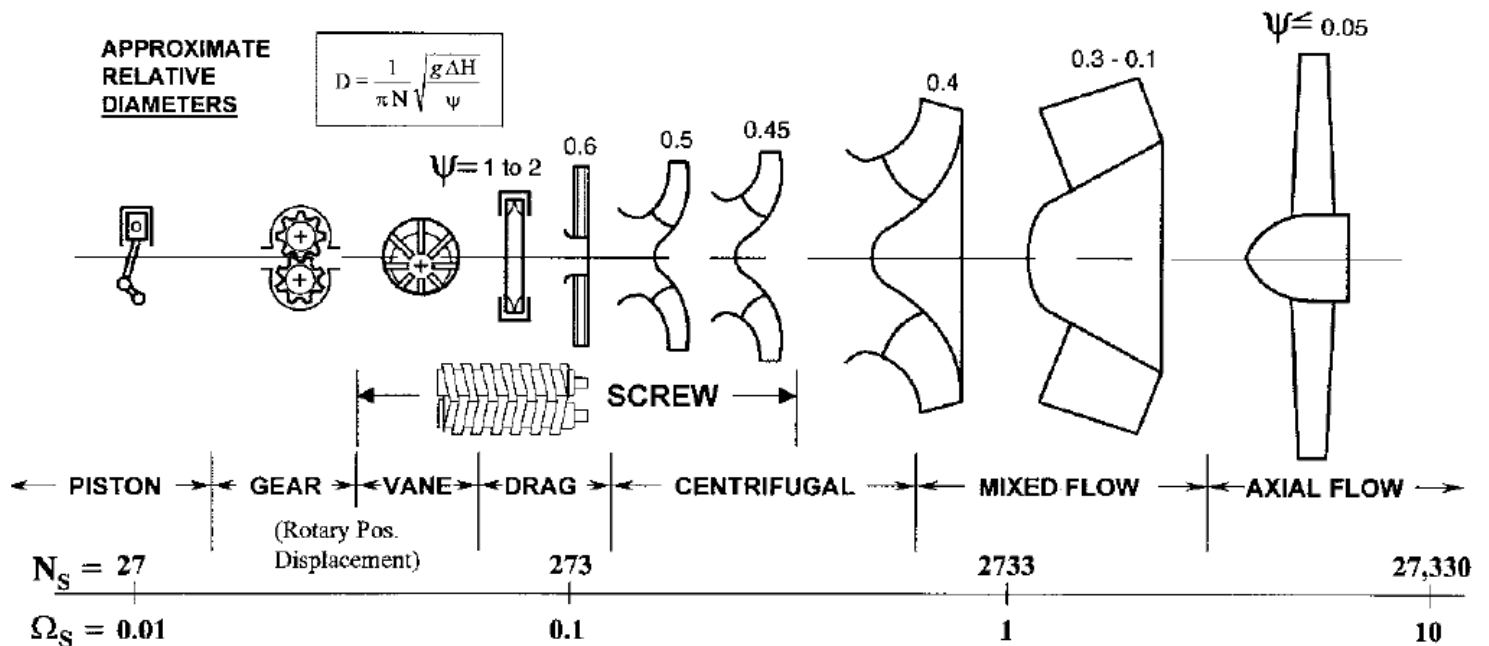


Figura 26 - Balance de pérdidas en las BC en el punto de mejor eficiencia

Diagramas de Selección



Specific Speed, $\Omega_s = \frac{\Omega \sqrt{Q}}{(g \Delta H)^{3/4}}$

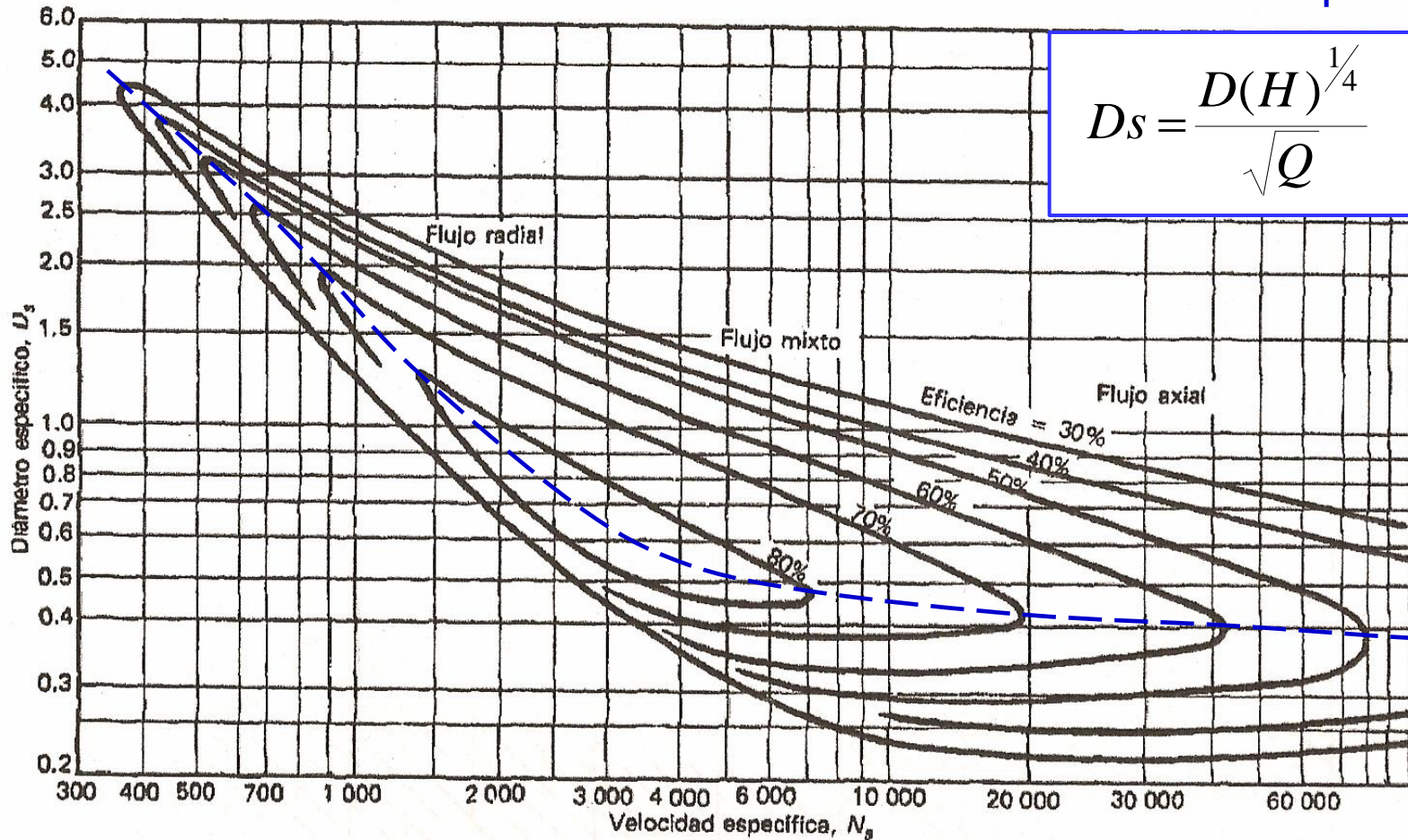
NOTE: $\left\{ N_{s,(U.S.)} = \frac{N(\text{rpm}) \times \sqrt{Q(\text{gpm})}}{[\Delta H(\text{ft.})]^{3/4}} = \Omega_s \times 2733 \right\}$

(Approximate Domains of Rotor types shown)

Diagrama de Cordier

Diámetro específico:

$$D_s = \frac{D(H)^{1/4}}{\sqrt{Q}}$$



Línea de Cordier

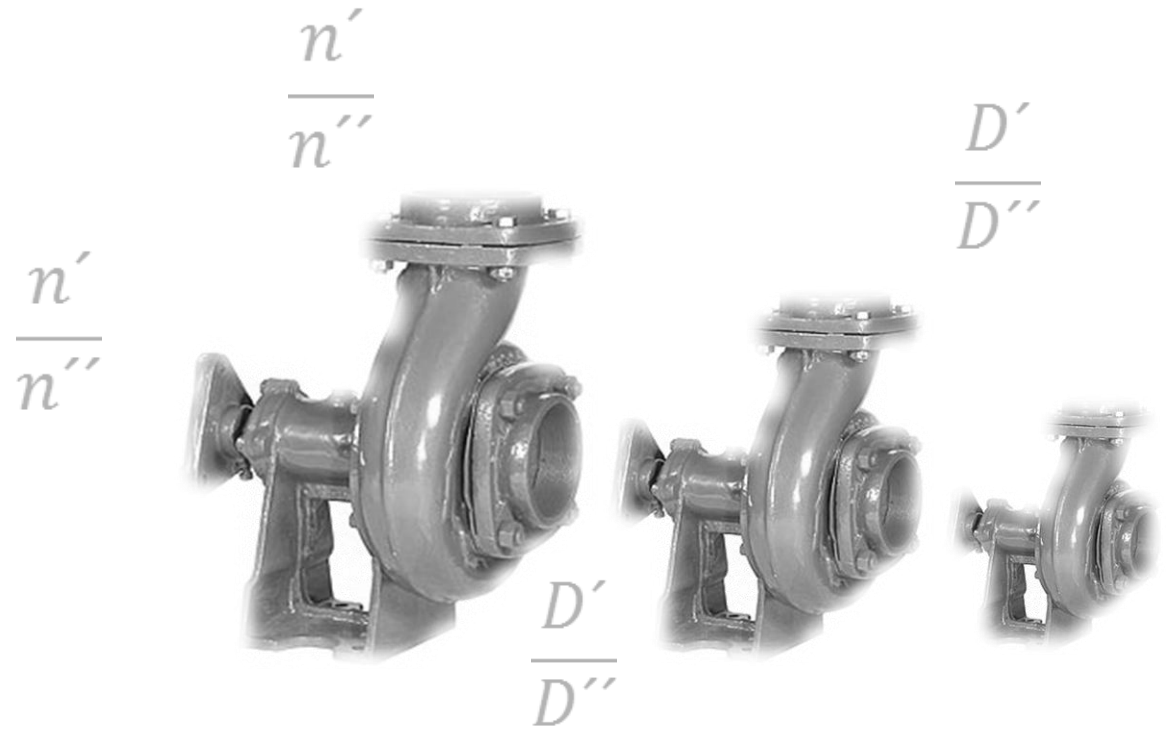
$$N_s = \frac{N \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

$$D_s = \frac{D H^{1/4}}{\sqrt{Q}}$$

N = rev/min
 Q = Flujo, gpm

H = Carga/ft
 D = Diámetro, in.

Leyes de Afinidad o Semejanza



Parámetros de Semejanza para Cavitación

Número de Thomas: $\sigma = \text{NPSH}/H$

De la instalación:
$$\sigma_{inst} = \frac{\text{NPSH}_d}{H}$$

Crítico:
$$\sigma_c = \frac{\text{NPSH}_r}{H}$$

Velocidad específica de cavitación referida al caudal:

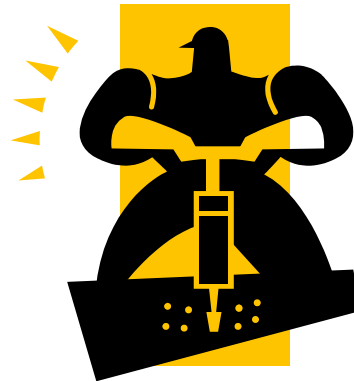
$$S = \frac{nQ^{1/2}}{\text{NPSH}_r^{3/4}}$$

$$n_q = \sigma^{3/4} S$$

Similitud en Bombas Centrífugas

Mismo Rotor, diferentes velocidades de Giro

En construcción



Leyes de Afinidad para Bombas

- Variación de la curva característica de una misma bomba cuando varía el número de revoluciones (variación moderada)
 - **D...constante y N...variable**

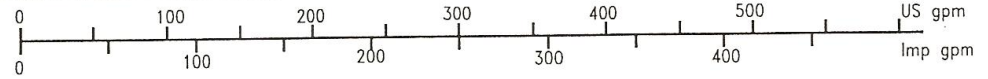
$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{n'}{n''} \quad \frac{H'}{H''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^2 \quad \frac{P'}{P''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^3$$



MP 125.80.400

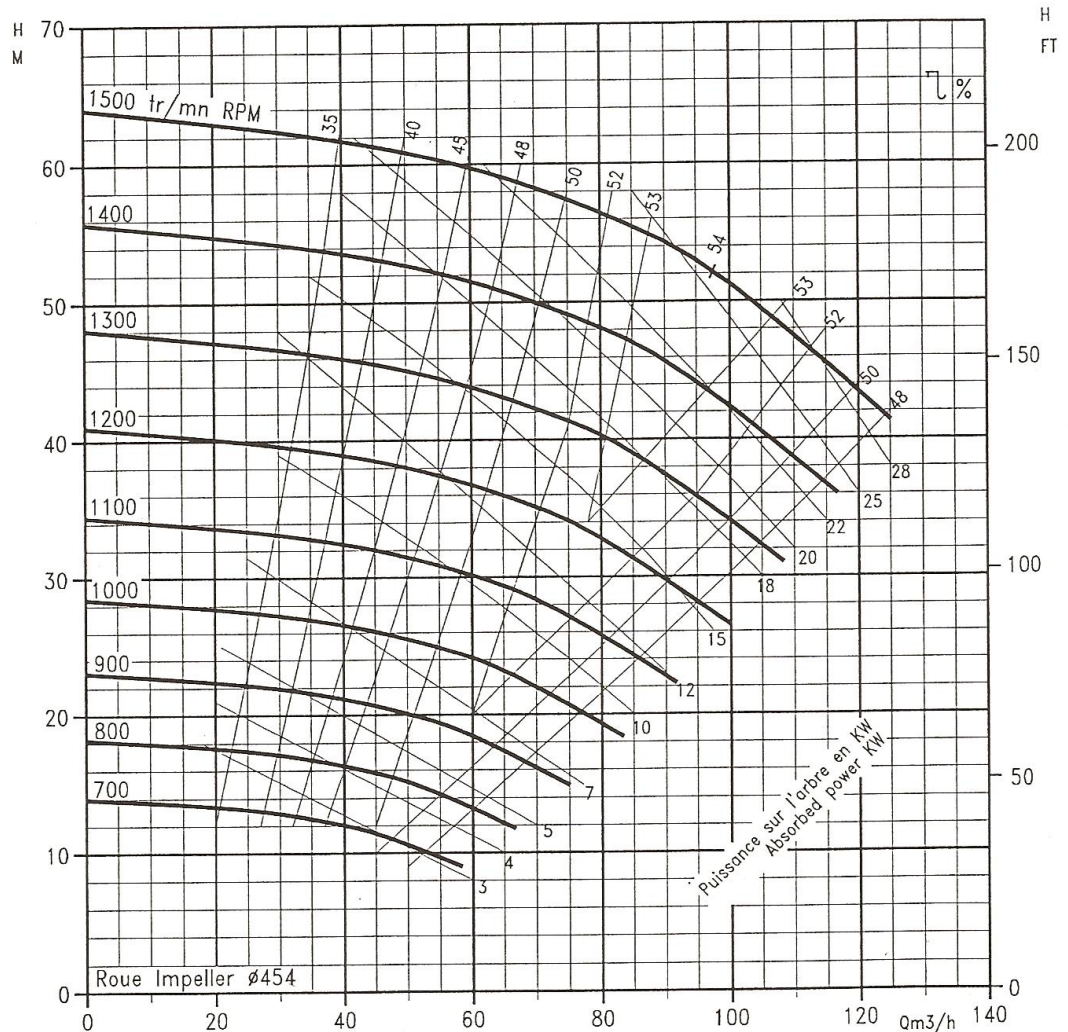
700 tr/mn
à / to
1500 tr/mn
Rpm

H1237



Similitud en Bombas Centrífugas

Mismo Rotor,
diferentes
velocidades de Giro



Similitud en Bombas Centrífugas

Mismo Velocidad de Giro, diferentes diámetros de Rotor

En construcción



Leyes de Afinidad para Bombas

- Variación de las características de dos bombas geoméricamente semejantes con el tamaño, si se mantiene constante el número de revoluciones (variación moderada)
 - **Dimpulsor...variable y N...constante**

$$\frac{Q'}{Q''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^3 \quad \frac{H'}{H''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^2 \quad \frac{P'}{P''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^5$$

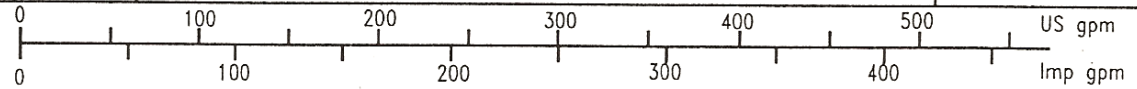


MORET

MP 125.80.400

1450 tr/mn
Rpm

H1238



Similitud en Bombas Centrífugas

Mismo Velocidad de Giro, diferentes diámetros de Rotor

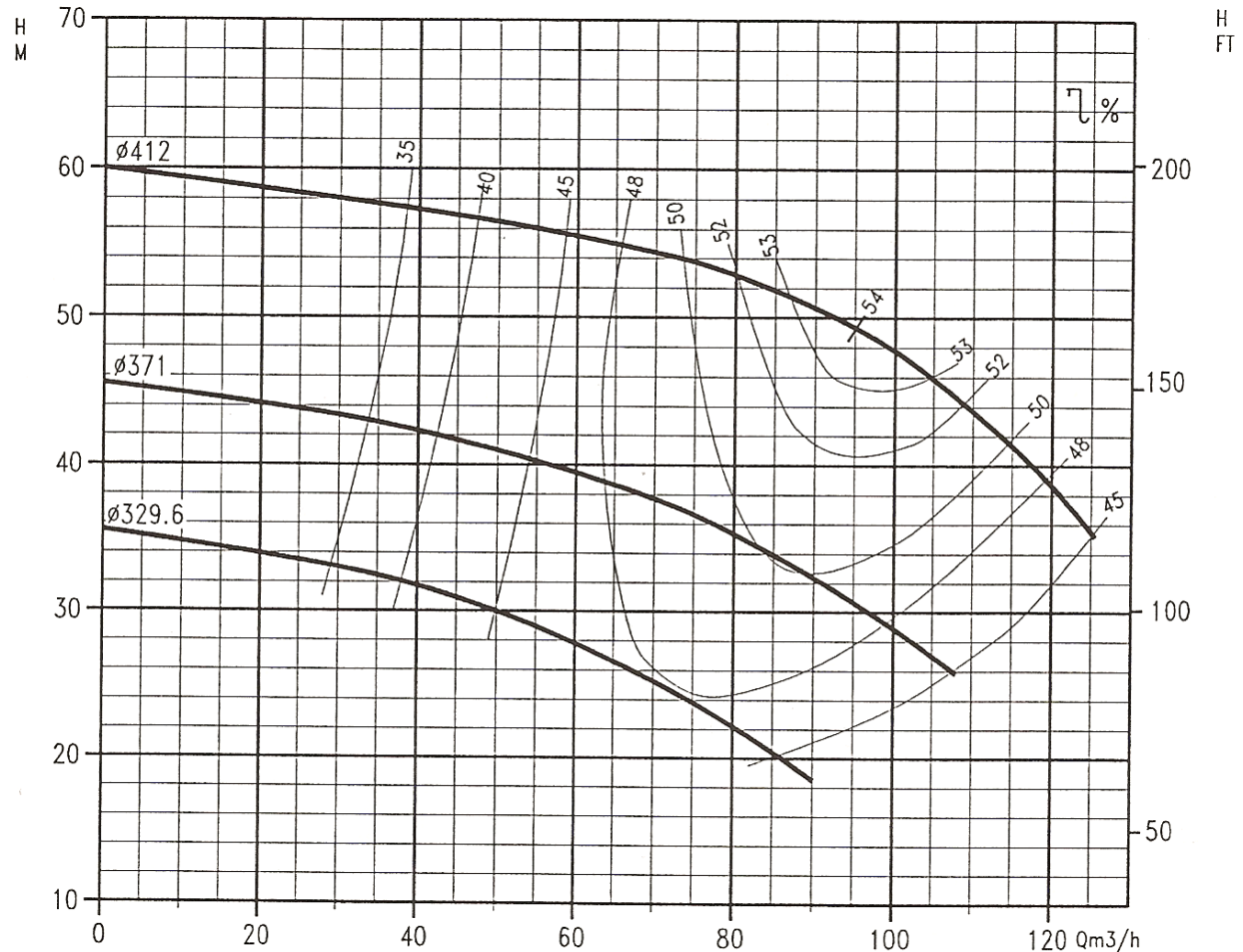


Diagrama Topográfico de BC

