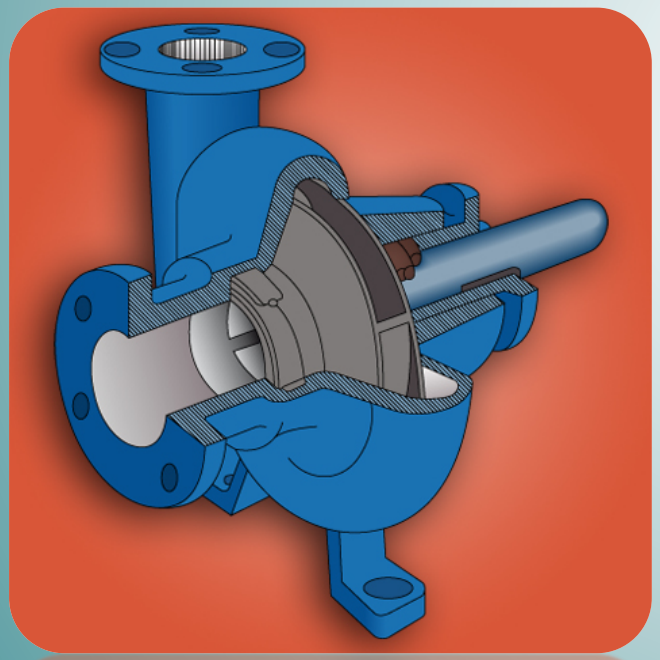
# Sistemas y Máquinas Fluido Mecánicas

## Bloque I. Tema 2.2.4. Bombas Centrífugas IV




**Carlos J. Renedo**

**Inmaculada Fernández Diego**

**Juan Carcedo Haya**

**Félix Ortiz Fernández**

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética



Este tema se publica bajo Licencia:

Creative Commons BY-NC-SA 4.0

Las trasparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, …) y elaborar sus propios apuntes

En esta presentación se incluye un listado de problemas en el orden en el que se pueden resolver siguiendo el desarrollo de la teoría. Es trabajo del alumno resolverlos y comprobar la solución

1.1.- Introducción a las Máquinas Hidráulicas

1.2.- Bombas Hidráulicas

1.1.1.- Generalidades de las Bombas Hidráulicas

1.2.2.- Bombas Centrífugas

1.2.3.- Bombas Volumétricas

1.3.- Turbinas Hidráulicas

- Características
- Campos de Aplicación
- Partes
- Rodetes
- La Voluta
- Clasificación
- Curva Característica
- Cebado
- Instalación
- Acoplamiento

- Potencias, Rendimientos y Pérdidas
- Cavitación
- Golpe de Ariete
- Catálogos de Fabricantes
- Leyes de Semejanza
- Número Específico de Revoluciones
- Influencia del Número de Alabes
- Punto de Funcionamiento
- Selección de una Bomba

## Leyes de Semejanza (I)

El fundamento de las leyes de semejanza es el ***análisis dimensional***

***Una ecuación debe ser dimensionalmente homogénea, sus términos deben tener las mismas dimensiones***

- Una variable es ***dimensional*** si su valor numérico depende de la escala utilizada en su medida, es decir, depende del sistema de unidades elegido (longitud, tiempo, potencia…)
- Una variable es ***adimensional*** cuando su valor numérico es independiente del sistema de unidades de medida (rendimiento, relaciones geométricas...)

***Aplicaciones*** de las leyes de semejanza:

- Determinar la respuesta de una máquina hidráulica cuando cambia alguna característica (velocidad de rotación, …)
- Obtener las características de una máquina geométricamente semejante a otra pero de diferente tamaño
- Parametrizar el comportamiento de las máquinas ensayadas a través de ábacos adimensionales y diagramas universales

## Leyes de Semejanza (II)

Para el modelo a escala: el subíndice "0".

***Condiciones de aplicación*** de las leyes de semejanza:

➢ ***Semejanza Geométrica***

- El modelo y el prototipo han de ser geométricamente semejantes tanto interior como exteriormente y en los elementos auxiliares
- En modelos a escalas muy reducidas, se pueden encontrar dificultades como el escalado de las holguras o las rugosidades superficiales

$\lambda$ es la relación geométrica entre modelo y prototipo

**Para longitudes**

$$\lambda = \frac{D}{D_0} = \frac{b}{b_0}$$

**Ancho del rodete**

**Diámetro del rodete**

**Para áreas**

$$\lambda^2 = \frac{A}{A_0}$$

**Para volúmenes**

$$\lambda^3 = \frac{Vol}{Vol_0}$$

## Leyes de Semejanza (III)

Para el modelo a escala: el subíndice "0".

***Condiciones de aplicación*** de las leyes de semejanza:

- ***Semejanza Geométrica***
- ***Semejanza Cinemática***
  - El modelo y el prototipo mantienen una proporcionalidad directa en los triángulos de velocidades en puntos de funcionamiento semejantes

$\alpha$ es la relación de velocidades de giro

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$\alpha_1 = \alpha_{10} \qquad \beta_1 = \beta_{10}$$

$$\alpha_2 = \alpha_{20} \qquad \beta_2 = \beta_{20}$$

## Leyes de Semejanza (III)

Para el modelo a escala: el subíndice "0".

***Condiciones de aplicación*** de las leyes de semejanza:

- ***Semejanza Geométrica***
- ***Semejanza Cinemática***

Fijadas las semejanzas geométrica, ($\lambda = D/D_0$), y cinemática, ($\alpha = n/n_0$), entonces queda fijada la velocidad en el modelo ($u_0 = \omega_0 \cdot r_0$)

Como $\beta$ y $\alpha$ se han de mantener ctes, $c_m$ será la que determine si el triangulo de velocidades del modelo es o no proporcional al del prototipo

$$Q = k_1 \cdot C_{1m} \cdot A_1 = k_2 \cdot C_{2m} \cdot A_2 \begin{cases} A_1 = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot b_1 \\ A_2 = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot b_2 \end{cases} \Rightarrow c_m = \frac{Q}{\pi \cdot D \cdot b}$$

Por lo que si:

- Se fija $\lambda$, ($D_0$ y $b_0$ están fijados), y sólo habrá un valor de Q que haga que ambos triángulos sean proporcionales
- Si se fija Q, sólo habrá un régimen de giro que haga que los triángulos sean proporcionales

## Leyes de Semejanza (III)

Para el modelo a escala: el subíndice "0".

***Condiciones de aplicación*** de las leyes de semejanza:

- ***Semejanza Geométrica***
- ***Semejanza Cinemática***

Fijadas las semejanzas geométrica, ($\lambda = D/D_0$), y cinemática, ($\alpha = n/n_0$), entonces queda fijada la velocidad en el modelo ($u_0 = \omega_0 \cdot r_0$)

Com ... el triar ... po

Q =

**Sólo habrá un punto de funcionamiento del modelo que cumpla con las semejanzas geométrica y cinemática, y que mantenga proporcionalidad con los triángulos de velocidades del prototipo**

**A esos puntos se les llama PUNTOS HOMÓLOGOS**

Por lo que si:

- Se fija $\lambda$, ($D_0$ y $b_0$ están fijados), y sólo habrá un valor de Q que haga que ambos triángulos sean proporcionales
- Si se fija Q, sólo habrá un régimen de giro que haga que los triángulos sean proporcionales

## Leyes de Semejanza (IV)

Para el modelo a escala: el subíndice “0”.

***Condiciones de aplicación*** de las leyes de semejanza:

- ***Semejanza Geométrica***
- ***Semejanza Cinemática***
- ***Semejanza Dinámica***
  - Cuatro de los cinco parámetros adimensionales fundamentales de la mecánica de fluidos han de ser iguales en el modelo y en el prototipo (el quinto será igual obligatoriamente si lo son los cuatro restantes)

## Leyes de Semejanza (IV)

Para el modelo a escala: el subíndice "0".

***Condiciones de aplicación*** de las leyes de semejanza:

- ***Semejanza Geométrica***
- ***Semejanza Cinemática***
- ***Semejanza Dinámica***

| | |
|---|---|
| **Gradiente de p** | • Número de Euler |
| **Viscosidad** | • Número de Reynolds |
| **Gravedad** | • Número de Froude |
| **Elasticidad** | • Número de Mach |
| **Tensión superficial** | • Número de Weber |

**Sólo estos dos números son significativos en las máquinas hidráulicas más corrientes**

**Y es Reynolds el que tiene verdadera trascendencia**

$$Eu = \frac{v}{\sqrt{2 \cdot \Delta p / \rho}} \qquad Re = \frac{v \cdot L_c}{\nu} = \frac{v \cdot \rho \cdot L_c}{\eta}$$

$$Fr = \frac{v_c}{\sqrt{L \cdot g}} \qquad Ma = \frac{v}{c_s} \qquad We = \frac{v}{\sqrt{L \cdot \sigma / \rho}}$$

En resumen: se cumple si Re es igual en modelo y prototipo

## Leyes de Semejanza (V)

Para el modelo a escala: el subíndice “0”.

Semejanza GEOMÉTRICA ( $\lambda$ )

$$\lambda = \frac{D}{D_0} = \frac{b}{b_0}$$

+

Semejanza CINEMÁTICA ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

+

Semejanza DINÁMICA ( Re )

$$Re = \frac{v \cdot L_c}{\nu}$$

SEMEJANZA ABSOLUTA

## Leyes de Semejanza (VI)

Para el modelo a escala: el subíndice "0".

En la práctica es muy difícil cumplir la condición de igualdad de Re

$$Re = \frac{v \cdot L_c}{\nu} = \frac{v \cdot L_c \cdot \rho}{\mu}$$

Al no cambiar el fluido ρ y μ no varían

prototipo

$$Re = Re_0 \quad \Big| \quad v = \omega \cdot \frac{D}{2} \quad \Big| \quad \Rightarrow n \cdot D_2^2 = n_0 \cdot D_{20}^2$$

modelo

$$n_0 = n \cdot \left( \frac{D_2}{D_{20}} \right)^2$$

Si $D_0 \downarrow\downarrow \Rightarrow n_0 \uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$ (algo que no siempre se puede realizar)

Además se introducirían efectos por la alta velocidad que no se reflejarían en el prototipo

Cuando no se puede cumplir la condición de igualdad de Re se habla de:

***SEMEJANZA RESTRINGIDA***

## Leyes de Semejanza (VII)

Se puede simplificar ya que la experiencia demuestra que para puntos de funcionamiento homólogos la diferencia en Re no tiene una gran influencia en el $\eta$, considerándose que ambos Re son iguales y dando pie así a hacer uso de la ***Teoría de la Semejanza Absoluta***

De este modo, se considera que entre dos puntos de funcionamiento homólogos en semejanza absoluta se conserva el rendimiento, al darse por válida la semejanza dinámica

## Leyes de Semejanza (VIII)

$C_m$ es la componente radial de la velocidad del fluido
$C_u$ es la componen tangencial de la velocidad del fluido

Si se cumplen las semejanzas geométrica ($\lambda$) y cinemática ($\alpha$) (I):

$$\lambda = \frac{D}{D_0} = \frac{b}{b_0} \qquad \alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$\alpha_1 = \alpha_{10} \qquad \beta_1 = \beta_{10}$$

$$\alpha_2 = \alpha_{20} \qquad \beta_2 = \beta_{20}$$

$$\frac{u_2}{u_{20}} = \frac{r_2 \cdot \omega}{r_{20} \cdot \omega_0} = \lambda \cdot \alpha$$

Relación de caudales:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{c_m \cdot A}{c_{m0} \cdot A_0} = \frac{c_m \cdot \pi \cdot D \cdot b}{c_{m0} \cdot \pi \cdot D_0 \cdot b_0} = (\alpha \cdot \lambda) \cdot \lambda \cdot \lambda = \alpha \cdot \lambda^3$$

Relación de alturas:

$$\frac{H_t}{H_{t0}} = \frac{(c_{2n} \cdot u_2)/g}{(c_{2n0} \cdot u_{20})/g} = (\alpha \cdot \lambda) \cdot (\alpha \cdot \lambda) = \alpha^2 \cdot \lambda^2$$

Relación de potencias:

$$\frac{Pot}{Pot_0} = \frac{(\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m)/\eta}{(\rho \cdot g \cdot Q_0 \cdot H_{m0})/\eta_0} = (\alpha \cdot \lambda^3) \cdot (\alpha^2 \cdot \lambda^2) = \alpha^3 \cdot \lambda^5$$

Relación de par en el eje:

$$\frac{M}{M_0} = \frac{Pot/\omega}{Pot_0/\omega_0} = \frac{Pot}{Pot_0} \cdot \frac{\omega_0}{\omega} = (\alpha^3 \cdot \lambda^5) \cdot \alpha^{-1} = \alpha^2 \cdot \lambda^5$$

## Leyes de Semejanza (IX)

Si se cumplen las semejanzas geométrica ($\lambda$) y cinemática ($\alpha$) (II):

- Si sólo cambia la velocidad:

$$\lambda = 1 \qquad \alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

Relación de caudales: $\frac{Q}{Q_0} = \alpha \cdot \lambda^3 = \alpha$

Relación de alturas: $\frac{H_t}{H_{t0}} = \alpha^2 \cdot \lambda^2 = \alpha^2$

Relación de potencias: $\frac{Pot}{Pot_0} = \alpha^3 \cdot \lambda^5 = \alpha^3$

Relación de par en el eje: $\frac{M}{M_0} = \alpha^2 \cdot \lambda^5 = \alpha^2$

## Leyes de Semejanza (X)

Para el modelo a escala: el subíndice "0".

Si se cumplen las semejanzas geométrica ($\lambda$) y cinemática ($\alpha$) (III):

- Si sólo cambia el rodete:

$$\lambda = \frac{D}{D_0} = \frac{b}{b_0} \qquad \alpha = 1$$

Relación de caudales: $\frac{Q}{Q_0} = \alpha \cdot \lambda^3 = \lambda^3$

Relación de alturas: $\frac{H_t}{H_{t0}} = \alpha^2 \cdot \lambda^2 = \lambda^2$

Relación de potencias: $\frac{Pot}{Pot_0} = \alpha^3 \cdot \lambda^5 = \lambda^5$

Relación de par en el eje: $\frac{M}{M_0} = \alpha^2 \cdot \lambda^5 = \lambda^5$

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (I)

Para el modelo a escala: el subíndice "0"

Ej: Bomba funcionando a ***distintas velocidades*** de giro (I)

Puesto que se trata de la misma bomba, se cumple que $\lambda = 1$

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{Q}{Q_0} = \alpha \\ \\ \dfrac{H_m}{H_{m0}} = \alpha^2 \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{H_m}{H_{m0}} = \alpha^2 = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2 \Rightarrow \quad H_m = \frac{H_{m0}}{Q_0^2} \cdot Q^2 = k_1 \cdot Q^2$$

### Parábolas de isorrendimiento (I)

Todos los puntos de la curva (H, Q) de funcionamiento <u>homólogos a uno dado de referencia</u> ($H_0$, $Q_0$) estarán <u>sobre una misma curva</u> (parábola) que pasará por el origen de coordenadas

$$H_m = k \cdot Q^2$$

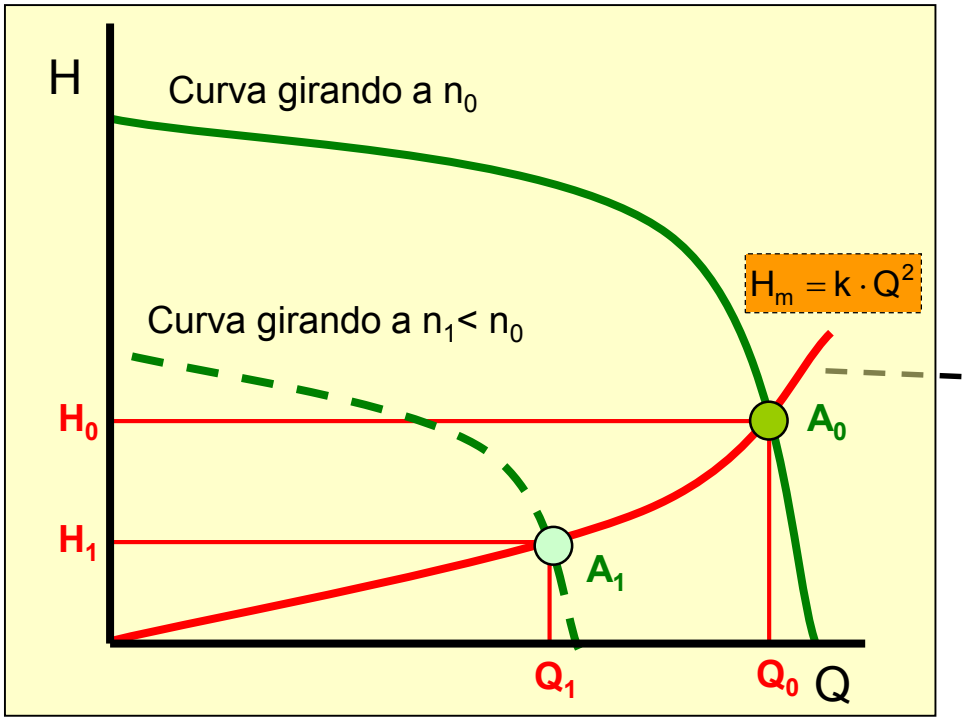
Hay que recordar que todos los puntos homólogos tienen el mismo rendimiento. Así, todos los puntos que pertenecen a la parábola tendrán el mismo rendimiento que el punto de funcionamiento dado como referencia

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (II)

Ej: Bomba funcionando a ***distintas velocidades*** de giro (II)

Parábolas de isorrendimiento (II)




Curva de puntos homólogos $H_0$, $Q_0$ (es decir de igual rendimiento que el tiene la bomba en el punto $H_0$ $Q_0$ girando a $n_0$) girando a distintas velocidades

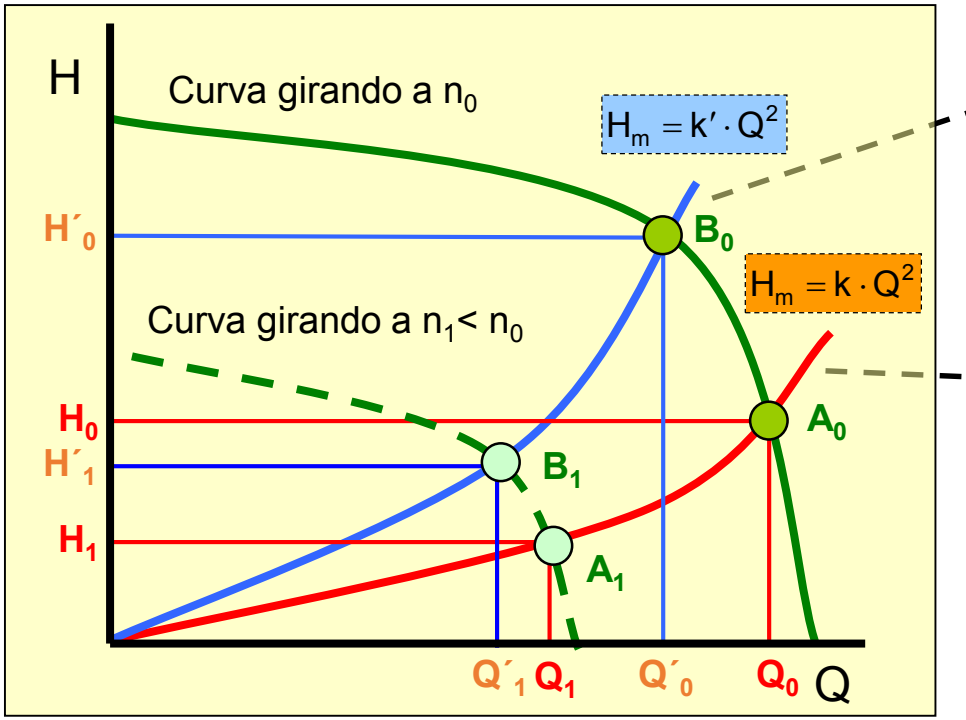
Cuando la bomba gira a $n_1$ debiera proporcionar $H_1$, $Q_1$ para que el rendimiento fuera el mismo

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (II)

Ej: Bomba funcionando a ***distintas velocidades*** de giro (II)

Parábolas de isorrendimiento (II)




Curva de puntos homólogos $H'_0$, $Q'_0$ (es decir de igual rendimiento que el tiene la bomba en el punto $H'_0$, $Q'_0$ girando a $n_0$) girando a distintas velocidades

Curva de puntos homólogos $H_0$, $Q_0$ (es decir de igual rendimiento que el tiene la bomba en el punto $H_0$ $Q_0$ girando a $n_0$) girando a distintas velocidades

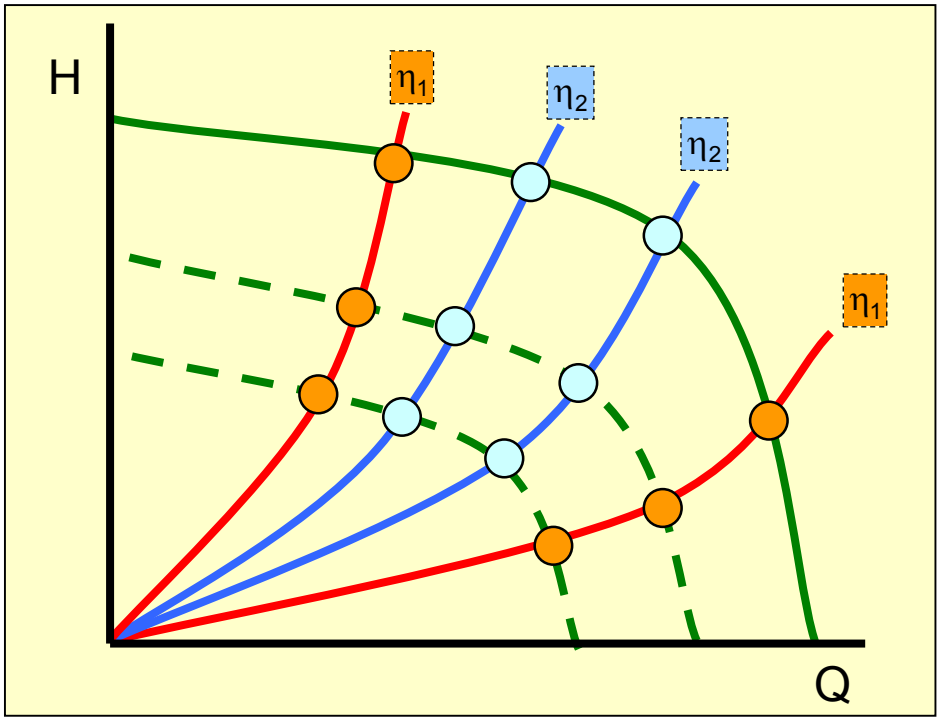
Cuando la bomba gira a $n_1$ debiera proporcionar $H_1$, $Q_1$ para que el rendimiento fuera el mismo

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (III)

Ej: Bomba funcionando a ***distintas velocidades*** de giro (III)

Parábolas de isorrendimiento (III) → Colinas de rendimientos



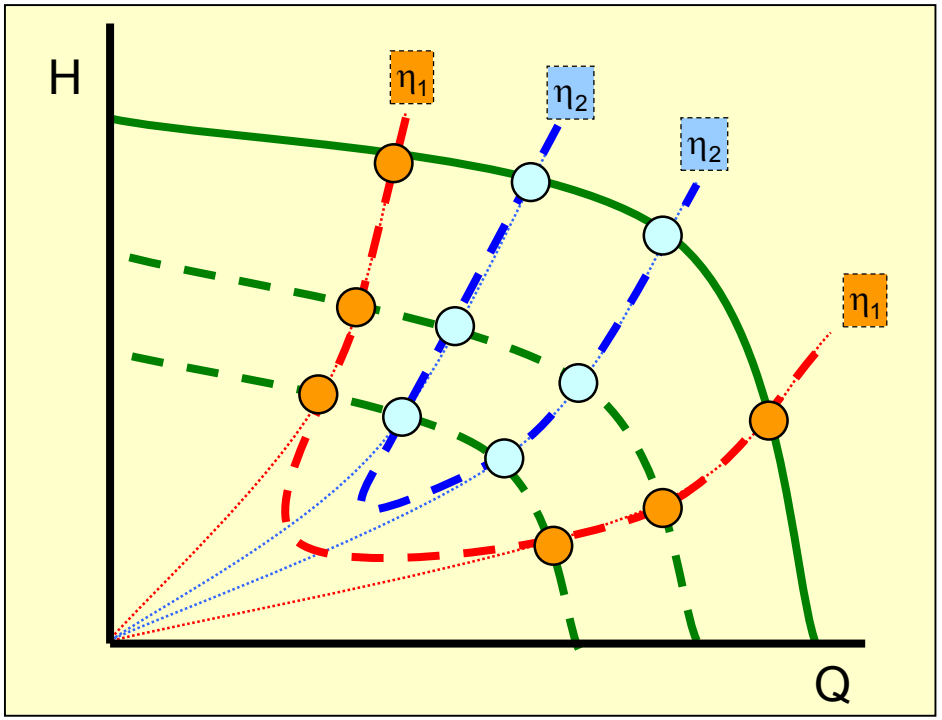

Para un número infinito de álabes del rodete las ***curvas teóricas de igual rendimiento*** pasan por el origen.

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (III)

Ej: Bomba funcionando a ***distintas velocidades*** de giro (III)

Parábolas de isorrendimiento (III) → Colinas de rendimientos




Para un número infinito de álabes del rodete las ***curvas teóricas de igual rendimiento*** pasan por el origen

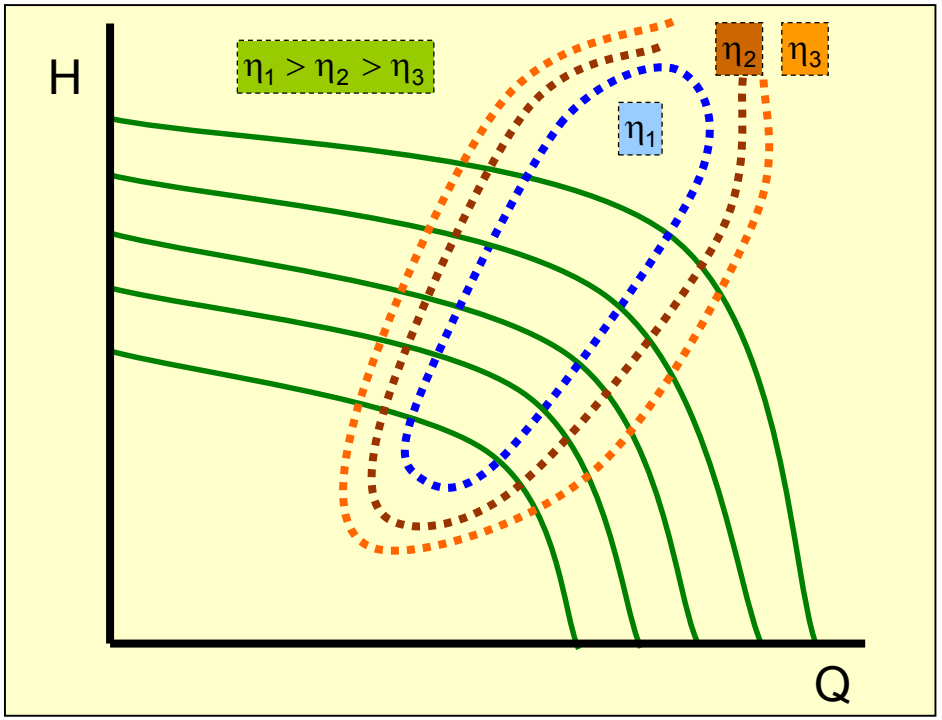
Pero para un número finito de álabes las ***curvas de reales de rendimiento*** se unen tanto por la parte inferior para pequeños caudales como por la parte superior para grandes caudales, dando lugar a unas curvas cerradas cuyo conjunto forma lo que se denomina ***colinas de rendimientos***.

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (IV)

Ej: Bomba funcionando a ***distintas velocidades*** de giro (IV)

Parábolas de isorrendimiento (IV) → Colinas de rendimientos




La justificación radica en que cada rodete tiene un rendimiento máximo para una velocidad de giro determinada

Los rendimientos reales para ***z*** álabes serán tanto más pequeños que los teóricos (con ∞ álabes) cuanto más se aleje la velocidad de giro de la óptima correspondiente al rendimiento máximo de la bomba

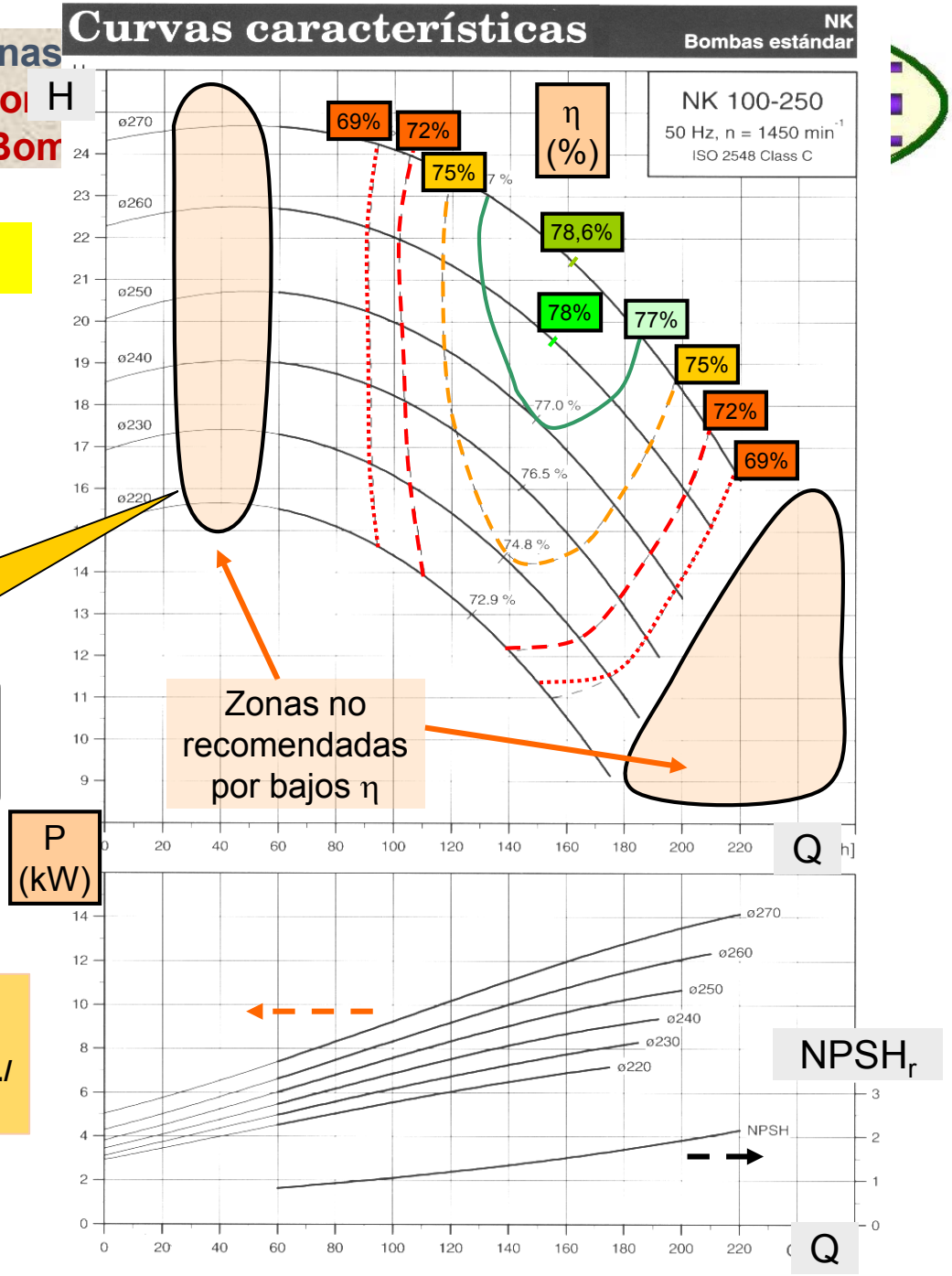
## Catálogos de Fabricantes (III)

Ej: Grundfos

***Familia de bombas***

- Gráfico de selección rápida
- Gráfico de selección

**η muy bajos**
(las pérdidas de energía calienta el fluido y se favorece la cavitación)




**http://product-selection.grundfos.com/catalogue.html?familycode=NKFAM&custid=BGE&lang=ESP#/Cat%C3%A1logo%20de%20prod./Familia%20de%20prod./NK%2C%20NKE/NK**

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (V)

A partir de las leyes de semejanza se puede determinar la curva característica de la bomba semejante

La curva característica es: $H_{man} = a - b\,Q - c\,Q^2$

$$\lambda = \frac{D}{D_0} = \frac{b}{b_0} \qquad \alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0} \qquad \frac{Q}{Q_0} = \alpha \cdot \lambda^3 \qquad \frac{H_t}{H_{t0}} = \alpha^2 \cdot \lambda^2 \qquad \frac{Pot}{Pot_0} = \alpha^3 \cdot \lambda^5 \qquad \frac{M}{M_0} = \alpha^2 \cdot \lambda^5$$

Ej: ***Bombas semejantes*** a la misma velocidad de giro (I)

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0} = 1 \Rightarrow \begin{cases} \dfrac{Q}{Q_0} = \lambda^3 \\ \dfrac{H_t}{H_{t0}} = \lambda^2 \end{cases}$$

$$\frac{H_m}{H_{m0}} = \lambda^2 = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{2/3} \Rightarrow H_m = \frac{H_{m0}}{Q_0^{2/3}} \cdot Q^{2/3}$$

$$H_m = k' \cdot Q^{2/3}$$

Todos los puntos (H, Q) de funcionamiento homólogos a uno dado de referencia ($H_0$, $Q_0$) estarán sobre una misma curva (parábola) que pasará por el origen de coordenadas

Todos los puntos homólogos tienen el mismo rendimiento, por lo que todos los puntos de la parábola tendrán el mismo rendimiento que el punto de referencia

## Leyes de Semejanza (XI)

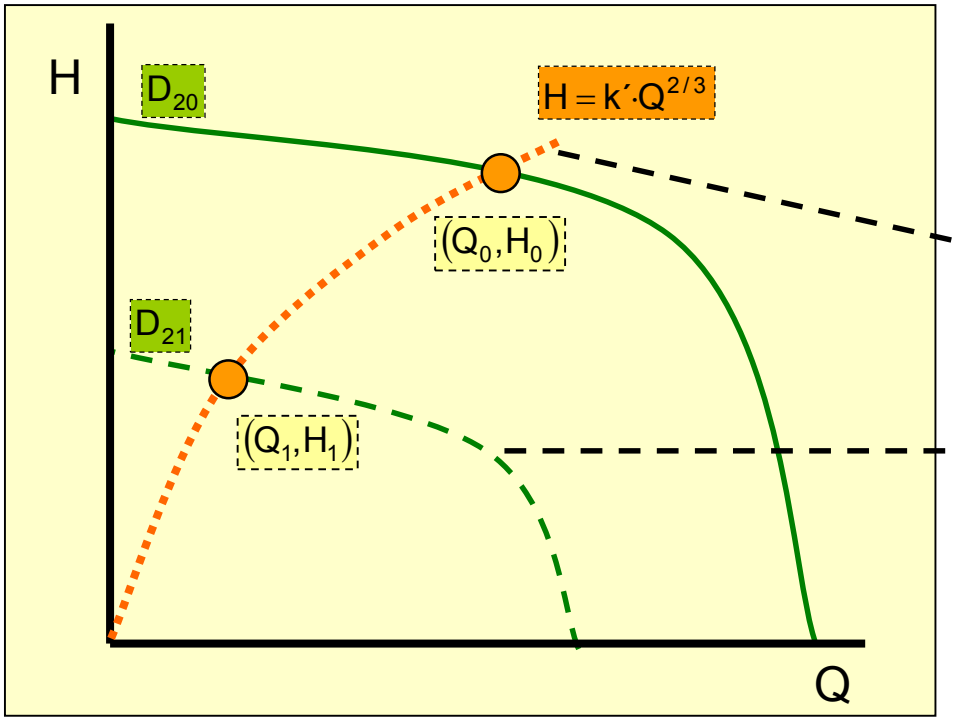
## Aplicación (VI)

Ej: ***Bomba semejantes*** a la misma velocidad de giro (II)

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0} = 1 \Rightarrow \begin{cases} \dfrac{Q}{Q_0} = \lambda^3 \\ \dfrac{H_t}{H_{t0}} = \lambda^2 \end{cases}$$

$$\frac{H_m}{H_{m0}} = \lambda^2 = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{2/3} \Rightarrow H_m = \frac{H_{m0}}{Q_0^{2/3}} \cdot Q^{2/3}$$

$$H_m = k' \cdot Q^{2/3}$$




Curva de ptos homólogos (de igual $\eta$ que la bomba en el pto $H_0$, $Q_0$) con distintos diámetros exteriores $D_2$

Cuando en la bomba tenga un rodete de diámetro $D_{21}$, proporcionará $H_1$ y $Q_1$ para que el $\eta$ se mantenga

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (VII)

Ej: ***Recorte del rodete*** con la misma velocidad de giro (I)

Se trata de un procedimiento muy útil y ampliamente utilizado por los fabricantes para adaptar la bomba a un punto de funcionamiento determinado

Consiste en limar la parte exterior del rodete para rebajarlo y así conferir a la bomba las características buscadas

Todos los parámetros de la bomba se mantienen inalterados, excepto el diámetro exterior $D_2$

Aplicando las relaciones de semejanza:

$$\left.\begin{array}{l} Q_0 = \pi \cdot D_{20} \cdot b_2 \cdot c_{2m0} \\ Q = \pi \cdot D_2 \cdot b_2 \cdot c_{2m} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{Q}{Q_0} = \frac{D_2}{D_{20}} \cdot \frac{c_{2m}}{c_{2m0}} = \frac{D_2}{D_{20}} \cdot \frac{u_2}{u_{20}} = \frac{D_2}{D_{20}} \cdot \frac{D_2}{D_{20}} = \left(\frac{D_2}{D_{20}}\right)^2$$

$$\left.\begin{array}{l} H_m = \dfrac{u_2 \cdot c_{2n}}{g} \cdot \eta_{man} \\ H_{m0} = \dfrac{u_{20} \cdot c_{2n0}}{g} \cdot \eta_{man} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{H_m}{H_{m0}} = \frac{u_2 \cdot c_{2n}}{u_{20} \cdot c_{2n0}} = \frac{u_2}{u_{20}} \cdot \frac{u_2}{u_{20}} = \left(\frac{u_2}{u_{20}}\right)^2 = \left(\frac{D_2}{D_{20}}\right)^2$$

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (VII)

Ej: ***Recorte del rodete*** con la misma velocidad de giro (I)

Se trata de un procedimiento muy útil y ampliamente utilizado por los fabricantes para adaptar la bomba a un punto de funcionamiento determinado

Consiste en limar la parte exterior del rodete para rebajarlo y así conferir a la bomba las características buscadas

Todos los parámetros de la bomba se mantienen inalterados, excepto el diámetro exterior $D_2$

Aplicando las relaciones de semejanza:

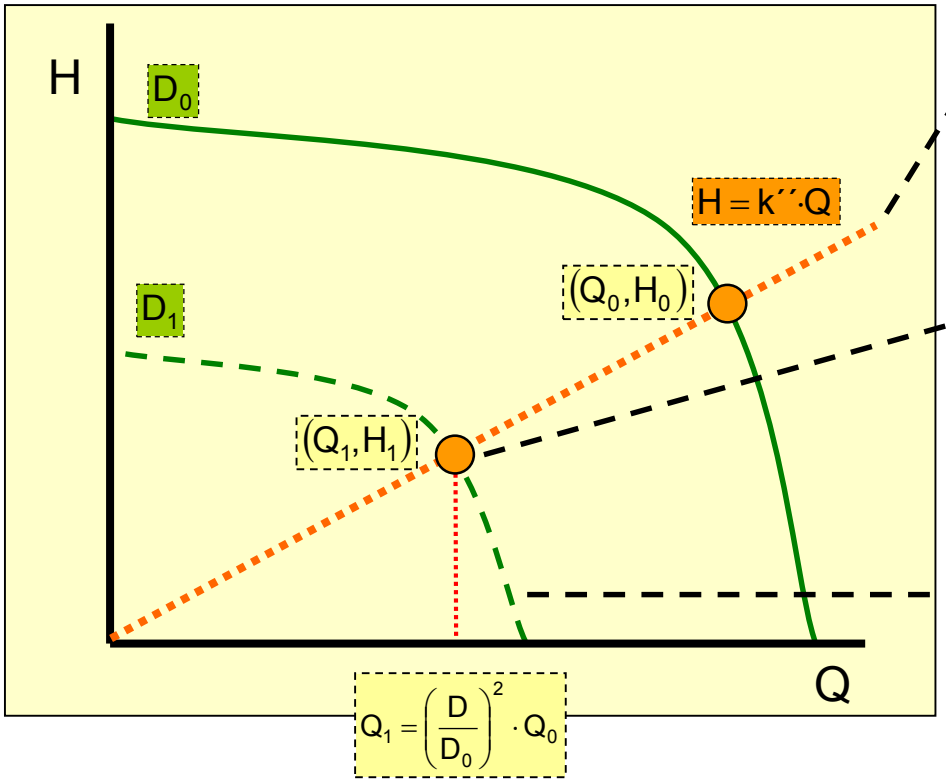
$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{Q}{Q_0} = \left(\dfrac{D_2}{D_{20}}\right)^2 \\[2ex] \dfrac{H_m}{H_{m0}} = \left(\dfrac{D_2}{D_{20}}\right)^2 \end{array}\right\} \quad \frac{H_m}{H_{m0}} = \frac{Q}{Q_0} \Rightarrow H_m = \frac{H_{m0}}{Q_0} \cdot Q \qquad H_m = k'' \cdot Q$$

**Línea recta que pasa por el origen**

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (VIII)

Ej: ***Recorte del rodete*** con la misma velocidad de giro (II)




Curva de puntos homólogos a ($H_0$, $Q_0$) es decir, de igual rendimiento que el que tiene la bomba en el punto ($H_0$, $Q_0$) con $D_{20}$, con distintos diámetros $D_2$

Cuando el rodete tenga un diámetro $D_2$, deberá proporcionar $H_1$ y $Q_1$ para que el rendimiento sea el mismo

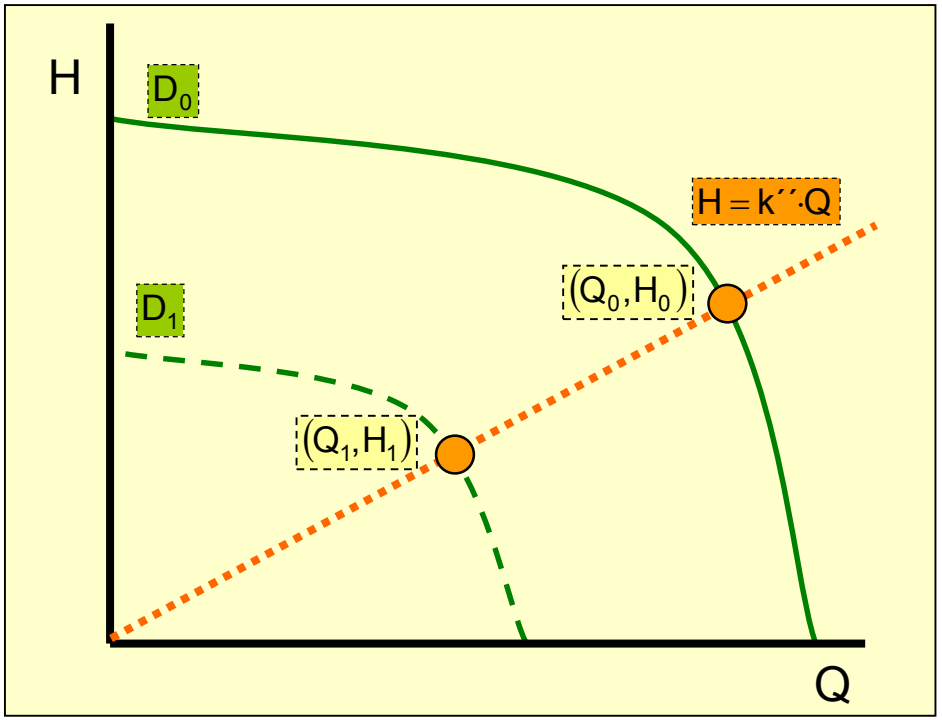
Curva de puntos homólogos a una bomba con rodete recortado $D_1$.

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (IX)

Ej: ***Recorte del rodete*** con la misma velocidad de giro (III)

Si de desea adaptar un rodete para que proporcione un caudal determinado, entonces:




$$\frac{H_0}{H_1} = \frac{Q_0}{Q_1} = \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2 = \left(\frac{r_{20}}{r_{21}}\right)^2$$

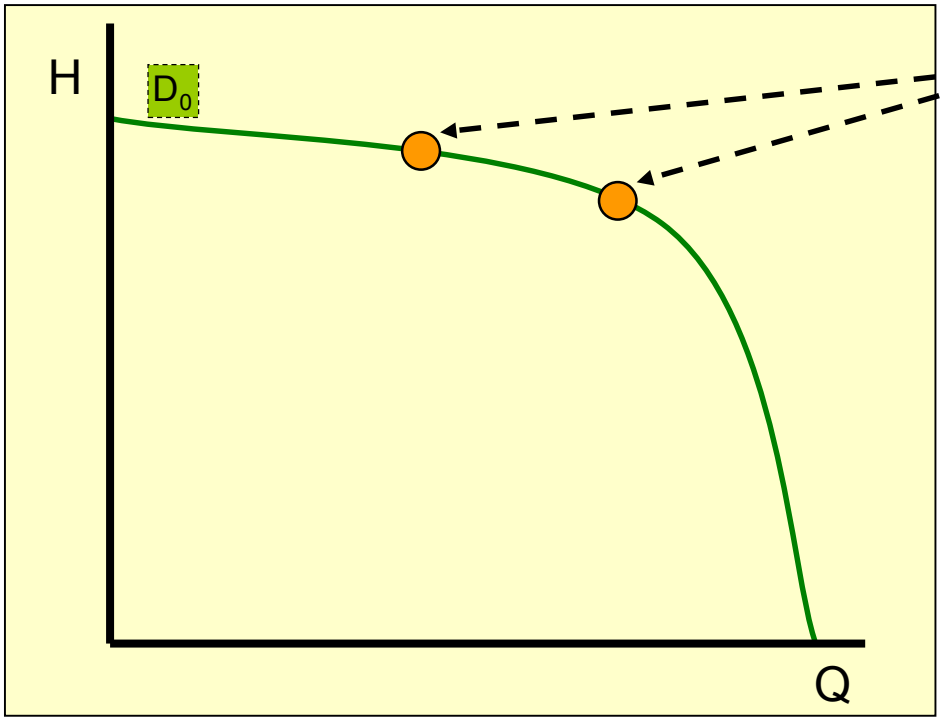
$$r_{20} = r_{21} \cdot \sqrt{\frac{Q_0}{Q_1}}$$

**La variación en el tamaño no debe ser mayor del 15%, en caso contrario el $\eta$ descendería considerablemente**

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (X)

Ej: Si de desea adaptar un rodete para que proporcione un caudal determinado, entonces (I):

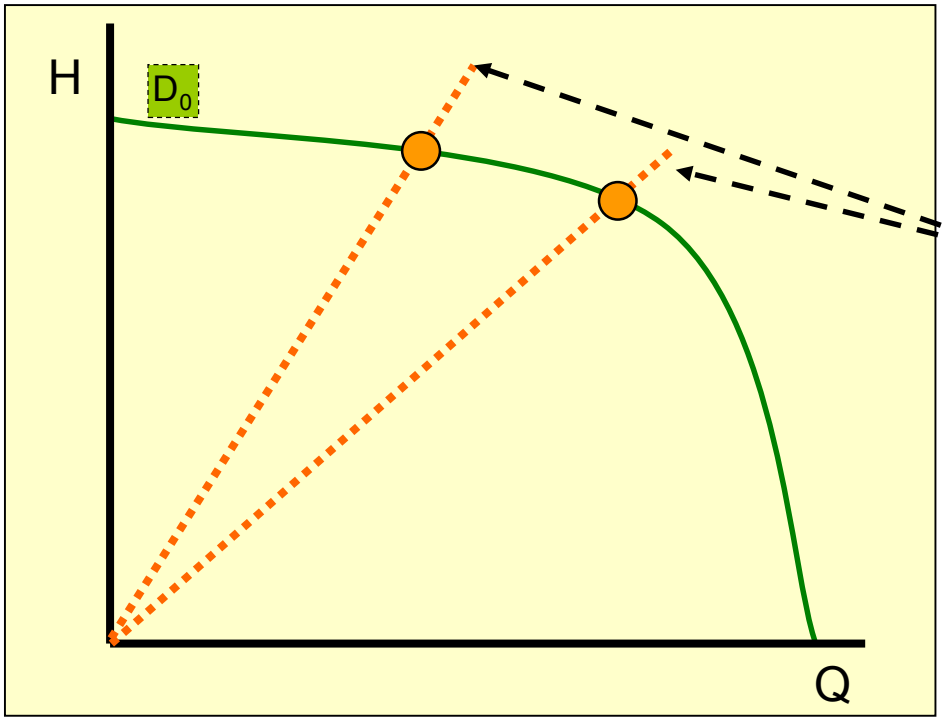



Se elige una zona de la curva por encima de un $\eta$ que se considera como el mínimo admisible

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (XI)

Ej: Si de desea adaptar un rodete para que proporcione un caudal determinado, entonces (I):



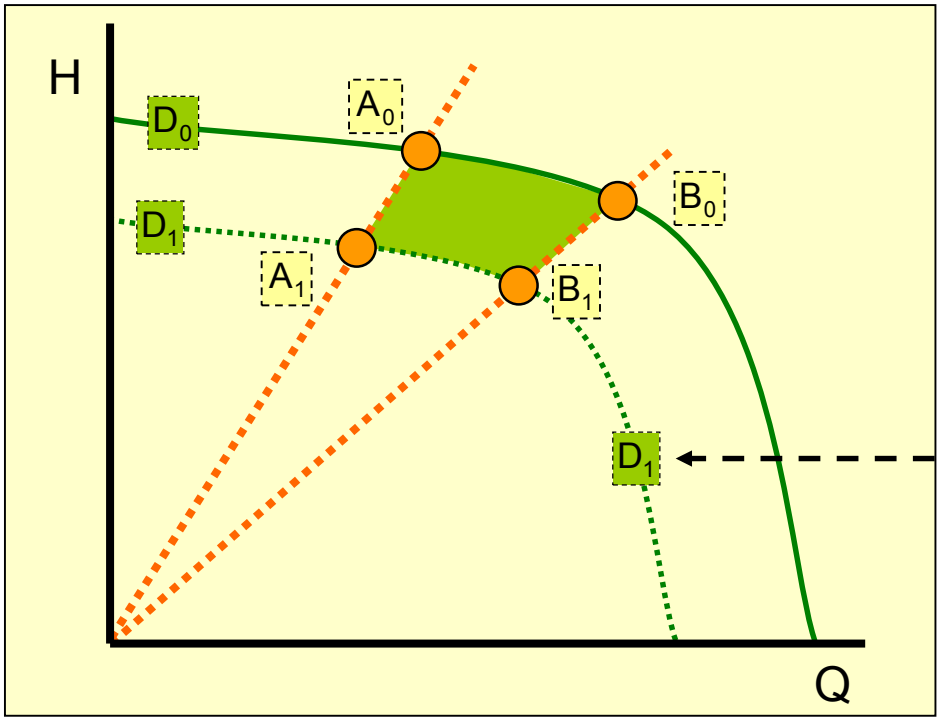

Se elige una zona de la curva por encima de un $\eta$ que se considera como el mínimo admisible

Los puntos homólogos estarán situados sobre una recta que pasa por ellos y por el origen

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (XII)

Ej: Si de desea adaptar un rodete para que proporcione un caudal determinado, entonces (I):




Se elige una zona de la curva por encima de un $\eta$ que se considera como el mínimo admisible

Los puntos homólogos estarán situados sobre una recta que pasa por ellos y por el origen

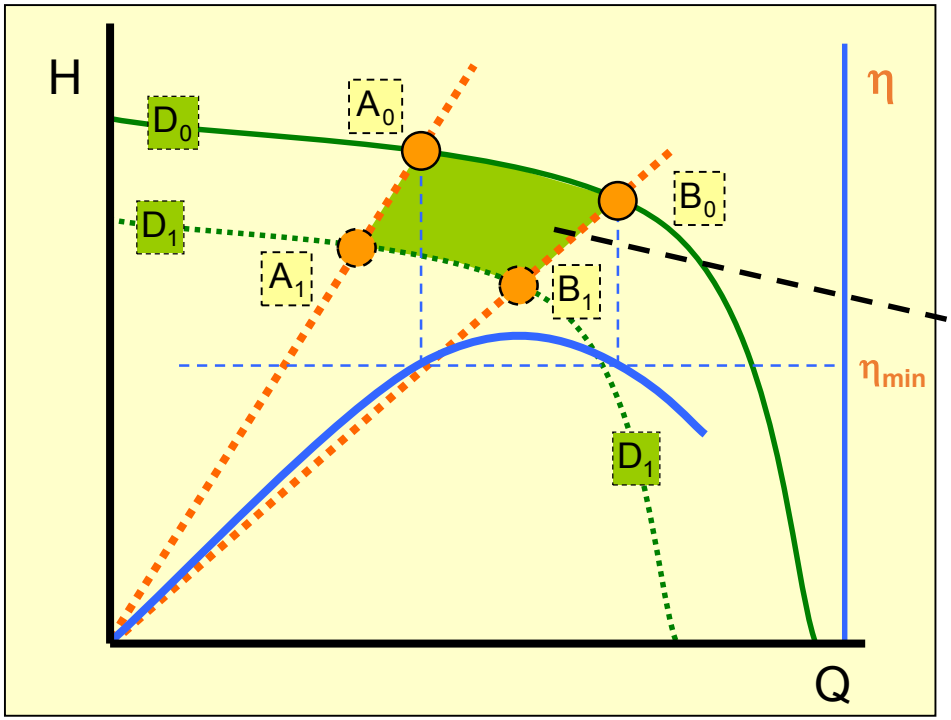
Para delimitar la zona tenemos que encontrar el límite inferior, que vendrá fijado por el máximo recorte (entre el 10 y el 15%)

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (XIII)

Ej: Si de desea adaptar un rodete para que proporcione un caudal determinado, entonces (II):

$$\frac{r_{20}}{1{,}15} < r_{21} < r_{20}$$

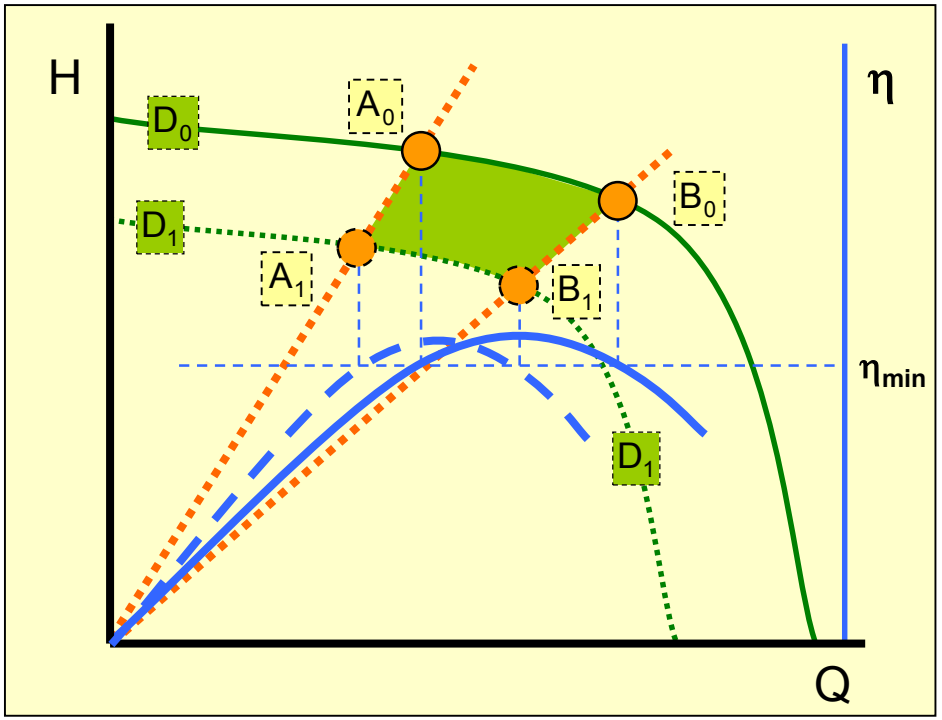



**Zona que la bomba con un rodete de radio exterior $r_{20}$ y $\eta$ superiores a un mínimo establecido puede trabajar en función del recorte del rodete**

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (XIV)

Ej: Si de desea adaptar un rodete para que proporcione un caudal determinado, entonces (III):




$$\frac{r_{20}}{1{,}15} < r_{21} < r_{20}$$

$$\text{Si}: \quad r_{21} = 0{,}88 \cdot r_{20}$$

$$\frac{H_0}{H_1} = \frac{Q_0}{Q_1} = \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2 = \left(\frac{r_{20}}{r_{21}}\right)^2 = \left(\frac{r_{20}}{0{,}88 \cdot r_{20}}\right)^2 = 1{,}29$$

$$H_1 = \frac{H_0}{1{,}29} \quad ; \quad Q_1 = \frac{Q_0}{1{,}29}$$

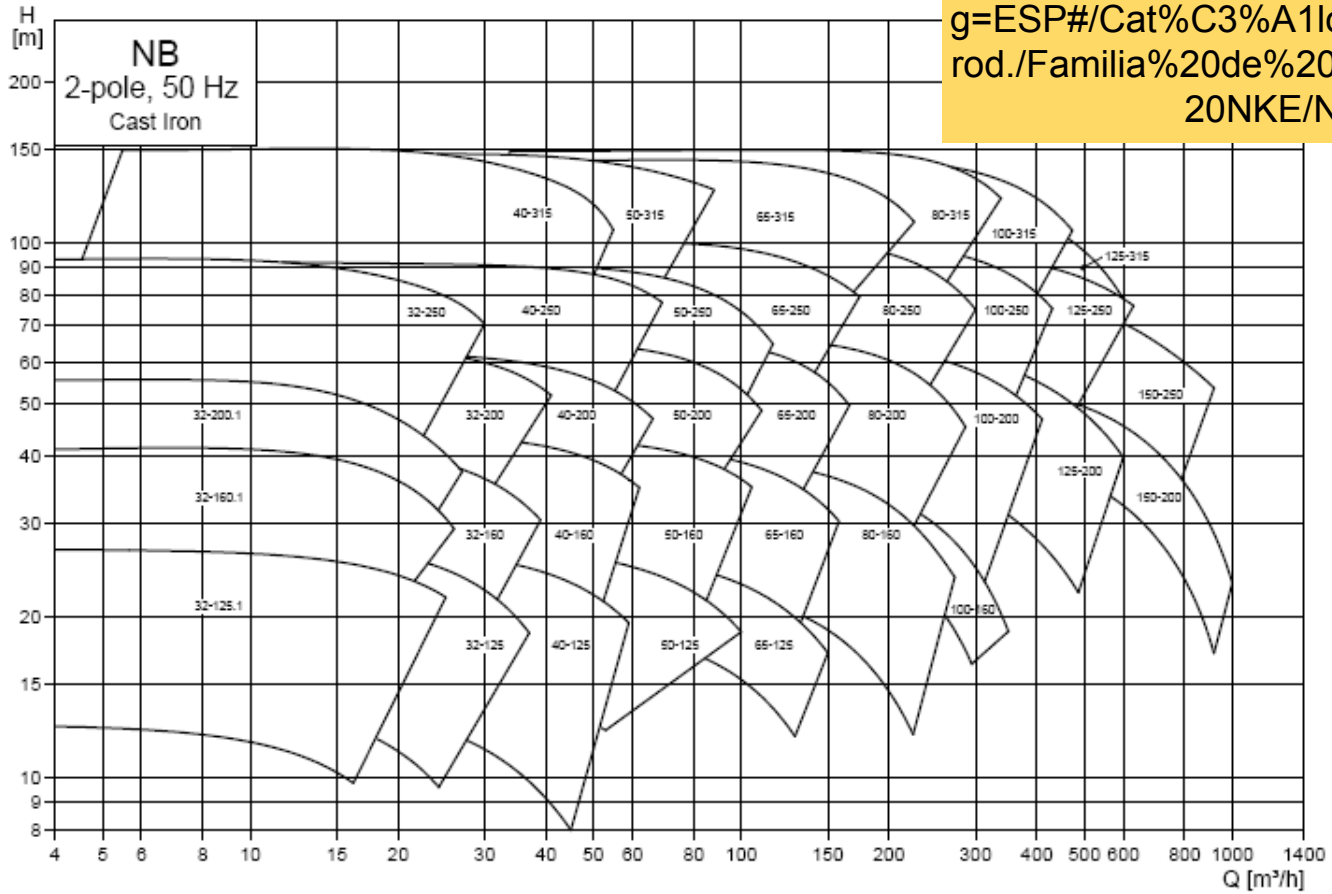
$$H_{A1} = 0{,}774 \cdot H_{A0}$$
$$H_{B1} = 0{,}774 \cdot H_{B0}$$
$$Q_{A1} = 0{,}774 \cdot Q_{A0}$$
$$Q_{B1} = 0{,}774 \cdot Q_{B0}$$

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (XV)

La aplicación a las selección de bombas (I)

http://product-selection.grundfos.com/catalogue.html?familycode=NKFAM&custid=BGE&lang=ESP#/Cat%C3%A1logo%20de%20prod./Familia%20de%20prod./NK%2C%20NKE/NK



## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (XVI)

La aplicación a las selección de bombas (II)

http://product-selection.grundfos.com/catalogue.html?familycode=NKFAM&custid=BGE&lang=ESP#/Cat%C3%A1logo%20de%20prod./Familia%20de%20prod./NK%2C%20NKE/NK

**Zona abarcada por una bomba con rodete de diámetro interior 40 mm y diámetro exterior 160 mm en función del recorte que se le haga a éste y en la que el rendimiento de la bomba se mantendrá dentro de unos límites aceptables**

## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (XVII)

La aplicación a las selección de bombas (III)

Los fabricantes no construyen bombas de funcionamiento óptimo para todos los puntos de funcionamiento (H, Q)

Lo que hacen es, con un número relativamente reducido de tipos y tamaños, barrer un gran abanico de posibilidades recortando el rodete garantizando, como se ha visto, que el rendimiento sea próximo al óptimo

Así, en los “mapas” que nos proporcionan los fabricantes, se busca el punto que se requiere de H y Q, el cual caerá dentro de una zona. Lo que se hará es seleccionar dicha bomba y recortar el rodete de modo que proporcione el punto de funcionamiento (H, Q) deseado

## Leyes de Semejanza (XI)

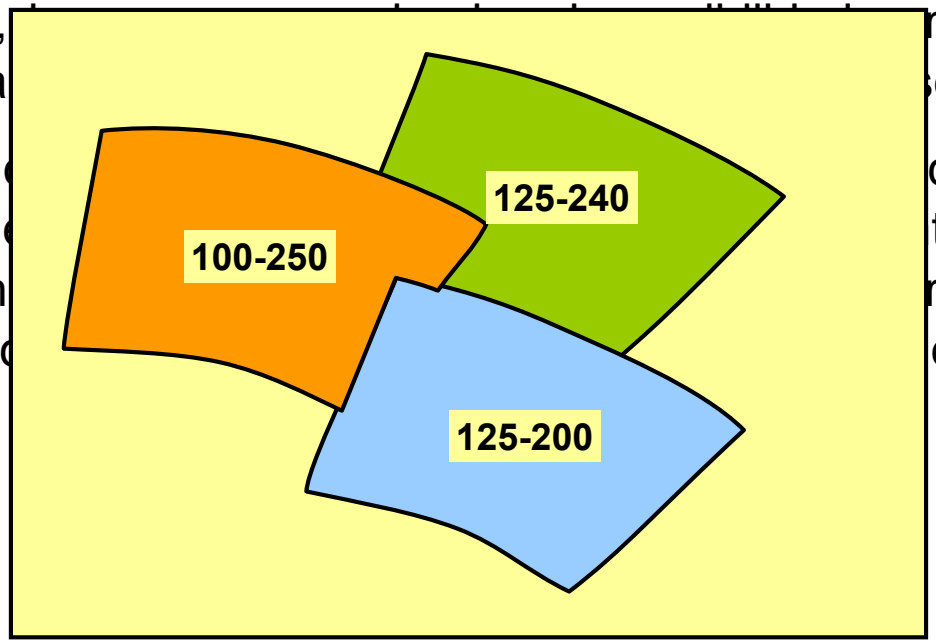
## Aplicación (XVII)

La aplicación a las selección de bombas (III)

Los fabricantes no construyen bombas de funcionamiento óptimo para todos los puntos de funcionamiento (H, Q)

Lo que hacen es, con un número relativamente reducido de tipos y tamaños, recortando el rodete garantiza ea óptimo

Así, en l cantes, se busca el punto qu tro de una zona. Lo que se h r el rodete de modo que propo eseado



## Leyes de Semejanza (XI)

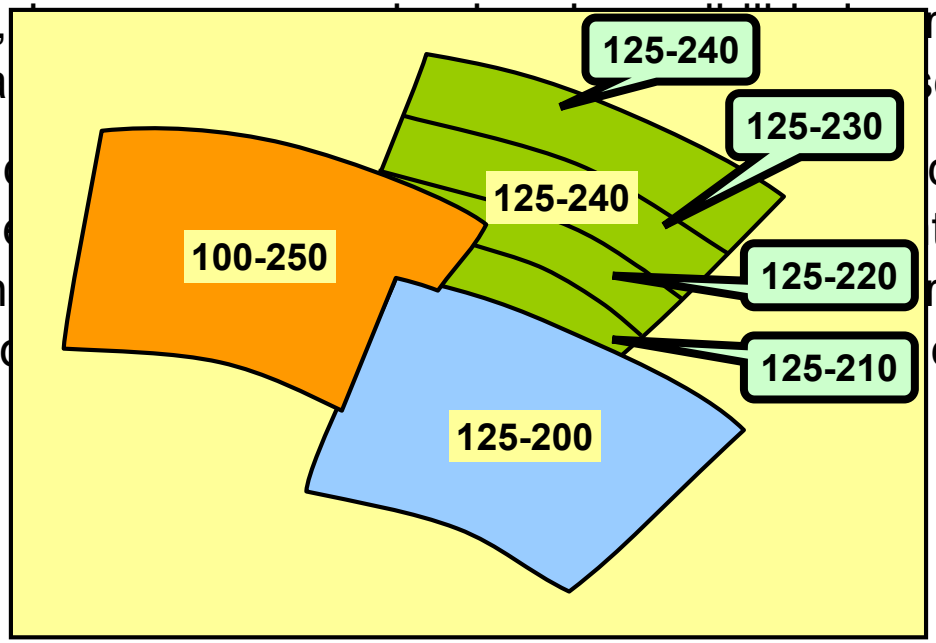
## Aplicación (XVII)

La aplicación a las selección de bombas (III)

Los fabricantes no construyen bombas de funcionamiento óptimo para todos los puntos de funcionamiento (H, Q)

Lo que hacen es, con un número relativamente reducido de tipos y tamaños, recortando el rodete garantiza ea óptimo

Así, en l cantes, se busca el punto qu tro de una zona. Lo que se h r el rodete de modo que propo eseado

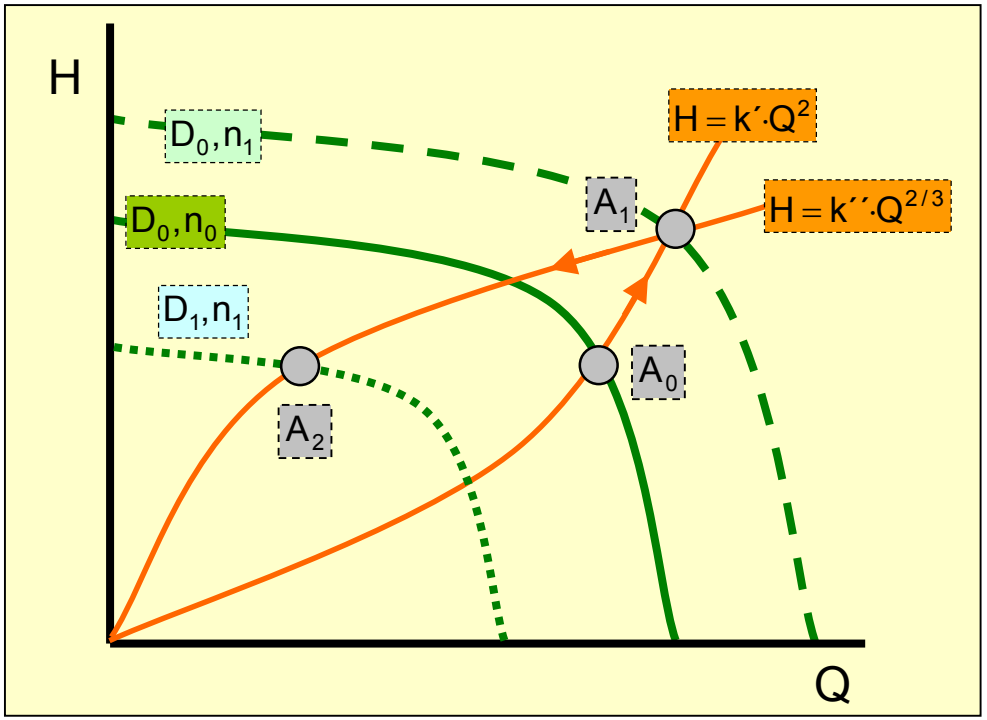


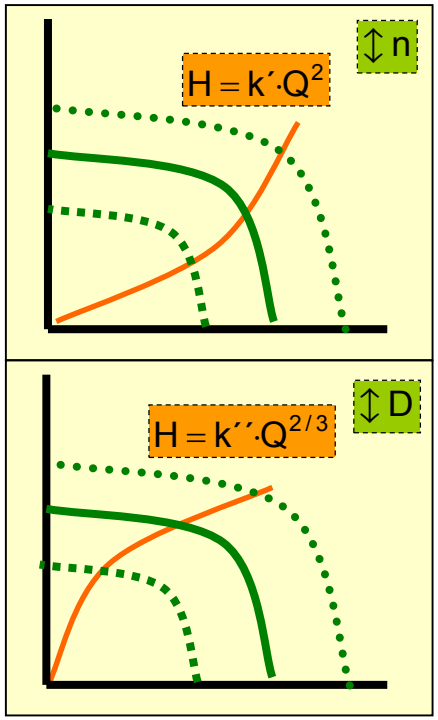
## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (XVIII)

Cambio del pto de funcionamiento de una bomba con $\eta$ cte:

- de $A_0$ a $A_1$ variando el nº de revoluciones de $n_0$ a $n_2$
- de $A_1$ a $A_2$, variando el tamaño de $D_0$ a $D_1$ con $n_1$

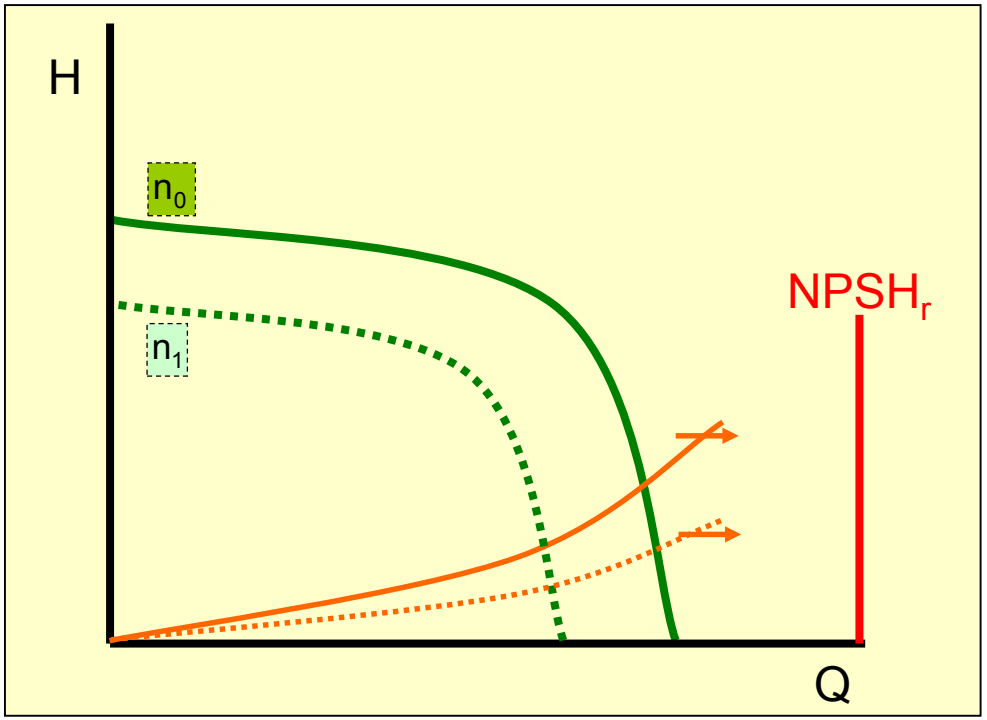


## Leyes de Semejanza (XI)

## Aplicación (XIX)

Caso del $NPSH_r$ de la bomba al variar la n




$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \Rightarrow \frac{NPSH_r}{NPSH_{r0}} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2$$

$$NPSH_{r1} = NPSH_{r0} \cdot \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2$$