
PRACTICAS DE MAQUINAS HIDRAULICAS (4º Ingeniero Industrial)

Normativa de las prácticas

- Las prácticas se impartirán en el Laboratorio de Energética, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. (S3-65); desarrollarán en dos sesiones, una de 3 horas, que corresponderá a bombas centrífugas, y otra de 2 de turbinas hidráulicas
- Realizadas la mismas se deberá entregar una única memoria **INDIVIDUAL** de la misma de un máximo de 12 páginas (bombas + turbinas).
- Para entregar la memoria es obligatoria la **asistencia a la totalidad de las prácticas**.
- La memoria se entregará al profesor de prácticas, Carlos J. Renedo, despacho S3-26.
- Fecha límite de entrega: **30 de mayo de 2005**.
- El orden de entrega de la memoria debe ser el de este guión.
- Todas las hojas entregadas han de estar numeradas.
- Los textos han de estar escritos a ordenador, letra arial, tamaño 10 u 11.
- **La memoria** no deberá incluir el guión entregado ni partes del mismo (excepto las curvas a comentar), sino que **deberá explicar conceptos, descripciones, datos, curvas, comentarios de los ensayos, ...**, deben ser aspectos a añadir a este guión.
- Quedarse con una copia, al menos en disquete, de la memoria.
- Al final de la memoria se incluirá una **conclusión general de la práctica**, en la que se hará referencia a posibles mejoras para la realización de las prácticas, ampliación de las instalaciones actuales, nuevas instalaciones que podrían resultar interesantes, posibles proyectos fin de carrera a realizar en el laboratorio,... . **Este apartado se considera que es una parte fundamental de la práctica.**

1.- Bombas Centrífugas

- 1.1.- Bombas centrífugas.
- 1.2.- Punto de funcionamiento de una bomba.
- 1.3.- Cavitación.
- 1.4.- Panel de cavitación.
- 1.5.- Variación del punto de funcionamiento de una bomba.
- 1.6.- Acoplamiento de bombas en paralelo.
- 1.7.- Acoplamiento de bombas en serie.
- 1.8.- Panel para el acoplamiento de bombas serie o en paralelo.
- 1.9.- Bomba sumergible.
- 1.10.- Datos de los ensayos realizados.
 - Ensayo de una bomba.
 - Ensayo de acoplamientos en serie.
 - Ensayo de acoplamientos en paralelo.
 - Ensayo manteniendo la altura de impulsión constante (Hsp-Q; H cte).
 - Ensayo manteniendo la altura de aspiración constante (H-Q; Hsp cte).
 - Ensayo de la bomba con fluido a diferente temperatura.
 - Ensayo de una bomba sumergible

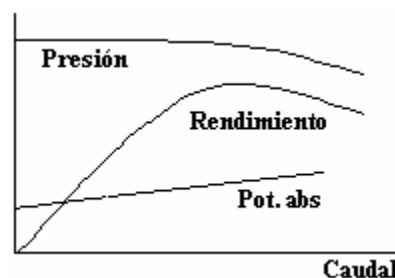
2.- Turbinas Hidráulicas

- 2.1.- Descripción y características del grupo hidráulico de ensayos.
- 2.2.- Introducción al ensayo de turbinas.
- 2.3.- Modo de funcionamiento y proceso operativo del banco.
- 2.4.- Curvas características de las turbinas.
- 2.5.- Estudio de semejanza.
- 2.6.- Programas para los ensayos.
- 2.7.- Toma de datos manual.
- 2.8.- Curvas obtenidas informáticamente.

1.- PRACTICA DE BOMBAS CENTRIFUGAS

1.1.- Bombas centrífugas

Se caracterizan por producir un flujo continuo de agua; el par de arranque es pequeño, lo que hace fácil su accionamiento, normalmente por un motor eléctrico de inducción. Al aumentar el caudal suministrado, la presión obtenida disminuye, y la potencia absorbida aumenta. Sus curvas características tienen el siguiente aspecto:



Los datos característicos de las bombas son su capacidad o caudal (m^3/h o l/h), la presión que suministra con dicho caudal (m.c.a.), la potencia consumida y la altura de aspiración.

Como inconvenientes tienen que presentan bajos rendimientos con caudales pequeños; y que no se autocebaban, ya que la depresión que crean en su entrada es pequeña y puede no ser suficiente para succionar el agua hacia la bomba cuando la bomba está situada a un nivel superior al de el depósito de alimentación de agua, para que la bomba empiece a funcionar, es preciso inundarla con agua (cebarla), y hay que purgar el aire de su interior.

En el laboratorio se pueden observar diferentes bombas, de las que cabe destacar:

- Todas ellas están accionadas por un motor eléctrico.
- Se puede observar la forma de espiral que encierran en el interior de la carcasa, es similar al caracol de una turbina Francis. El sentido de esta espiral determina el sentido de giro que ha de tener la bomba.
- Se pueden observar diferentes rodetes, estos se diferencian por:
 - El ángulo de sus álabes, se puede ver como los de una bomba que pertenece a una caldera doméstica de agua caliente sanitaria y calefacción los tiene a 90° .
 - Sección de aspiración (pueden aspirar por una o por las dos caras del rodete).
 - Existe un ejemplo de un rodete semiabierto.
- Se ve como una de ellas (azul sobre una plataforma de madera) tiene un dispositivo para proceder al cebado de la bomba (llenado de agua del rodete, ya que la bomba no puede funcionar con aire en su interior).
- Se observa como una carcasa incorpora un dispositivo de bypass entre la impulsión y la aspiración.
- Las bombas instaladas en el banco de ensayo de las turbinas no tienen dispositivo de cebado, ya que trabajan con el nivel de agua por encima, con lo que su rodete está siempre inundado.
- Se puede disponer de un bypass entre la aspiración y la impulsión, de modo que se puedan arrancar con la mínima carga posible, y no se sobrecarga el motor de accionamiento (como las bombas del banco de ensayo de las turbinas).
- Una válvula instalada en la impulsión de una bomba permite controlar el caudal que suministra la bomba, ya que al ir cerrando esta válvula progresivamente, se crea una pérdida de carga en la tubería que modifica el punto de funcionamiento de la bomba en su curva característica (Q-H).

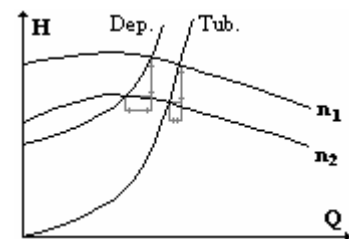
- En las bombas de las calderas domésticas de ACS y calefacción se ve como se coloca un purgador de aire en la entrada de la bomba para evitar en la medida de lo posible la entrada de aire en el rodete, ya que al trabajar con agua caliente aumentan los peligros de que se produzca cavitación en la bomba.
- En la bomba del grupo contra incendios se observa como la tubería de aspiración es de mayor sección, el rodete aspira por las dos caras, lo que elimina los esfuerzos axiales, como la estanqueidad de busca en la baja presión, y como se puede desmontar sin soltar las tuberías.
- Se puede observar una bomba de eje vertical, en este caso la tubería inferior es la que comunica con el centro del rodete, y por tanto la de aspiración.
- En el laboratorio hay una bomba multicelular de eje vertical, en la que se puede observar como el agua enviado por el rodete se recoge en lugar de tener una envolvente en forma de espiral, esta tiene varias salidas, y tras ellas el agua se conduce de forma menos brusca posible hacia el centro, para ser aspirada por el siguiente rodete.
- Igualmente se puede ver otra bomba, en este caso no es centrífuga, ya que el rodete no aspira por el centro, sino que es similar a una rueda de molino, que comunica velocidad al fluido.
- También se puede ver una bomba sumergible para aguas sucias despiezada y como se logra la estanqueidad de la electricidad en la misma.

1.2.- Punto de funcionamiento de una bomba

El funcionamiento de una bomba está marcado por la intersección entre la curva característica de la bomba y la de la tubería.

La forma de la curva de una tubería es parabólica de segundo grado que parte del origen, pero si la tubería transporta agua de un depósito de un nivel inferior a otro superior esta curva adquiere está desplazada verticalmente del origen (*Dep.*).

En el primer caso no se ve alterado sustancialmente el caudal suministrado por la bomba al variar levemente el régimen de revoluciones, mientras que en el segundo caso puede que si, esto además afecta al rendimiento de la bomba, sacándola de las proximidades del punto de máximo rendimiento.



1.3.- Cavitación

En la entrada de la bomba ésta crea una depresión, que es la que hace a la bomba capaz de succionar el agua.

Con bajas presiones el aire que lleva disuelto el agua se desprende y forma burbujas que perjudican el funcionamiento de la bomba; si la presión existente en ese punto del circuito se hace inferior a la tensión de vapor del agua, esta se evapora, dando lugar a la cavitación.

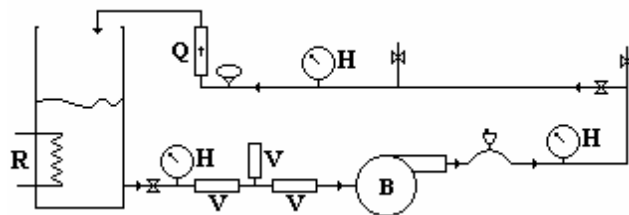


Las bolsas de vapor producidas disminuyen el espacio ocupado por el líquido, reduciendo el caudal, altura, rendimiento,... ; cuando el vapor llega a una zona donde se supera la tensión de vapor (dentro del rodete), se transforma en líquido bruscamente, lo que es fuente de ruidos y vibraciones. Esta vaporización es la cavitación y debe evitarse porque además de ser fuente de ruidos provoca el desgaste mecánico de las piezas por las vibraciones y por el golpeo.

Este fenómeno de la cavitación se acentúa si el agua está caliente, ya que esta formación de burbujas puede hacerse con una menor presión.

1.4.- Panel de cavitación

En este panel se dispone de una válvula de cierre antes de la aspiración de la bomba, de modo que se pueda crear una pérdida de carga y ver la formación de burbujas en un visor; asimismo se puede medir la depresión que crea la bomba en su entrada.



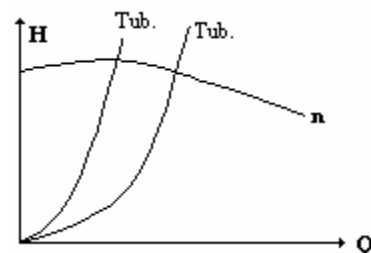
Puede observarse como después de que se haya introducido aire en el rodete, este debe ser purgado para que la bomba vuelva a funcionar con normalidad, ya que la bomba con aire en su interior no es capaz de funcionar correctamente.

Este panel además incluye una resistencia eléctrica en el depósito de agua de modo que se pueda variar la temperatura del agua, y con ello favorecer el fenómeno de la cavitación por el aumento de la temperatura del fluido; esto además permite observar como afecta la temperatura del agua al funcionamiento de la bomba.

1.5.- Variación del punto de funcionamiento de una bomba

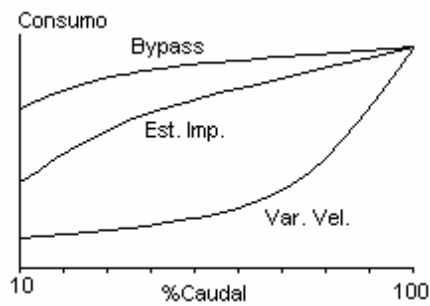
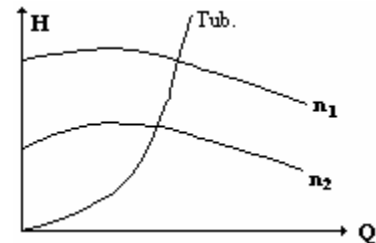
La variación del punto de funcionamiento de una bomba para que funcione con caudales inferiores al nominal puede hacerse de varias formas:

- Instalando un depósito de acumulación para los periodos de demanda punta.
- Instalando varias bombas en paralelo.
- Provocando una pérdida de carga adicional; se puede crear en una válvula situada en la tubería de impulsión. *Al insertar una pérdida de carga adicional se cambian las características de la tubería, y el punto de funcionamiento de la bomba. Este método lleva asociado un gasto energético para vencer la pérdida de carga "innecesaria" que lleva asociada la válvula.*



- Con un bypass entre la impulsión y la aspiración de la bomba. *Este método también lleva asociada una pérdida de carga innecesaria, ya que parte del fluido que mueva la bomba circula por el bypass.*
- Variando la velocidad de giro de la bomba, generalmente con un convertidor electrónico que cambie la frecuencia de la alimentación eléctrica del motor.

Este método no lleva asociadas pérdidas energéticas (salvo las internas del convertidor); mejora las condiciones mecánicas; alarga la vida del motor al disminuir la intensidad demandada en el arranque; evita los golpes de ariete en las paradas de la bomba; permite el funcionamiento para caudales muy bajos.



Si se compara el consumo eléctrico de la bomba con los tres últimos métodos de control de caudal obtenemos una curva como la siguiente, en la que se observa que es mejor energéticamente estrangular la impulsión que realizar un bypass en la bomba:

1.6.- Acoplamiento de bombas en paralelo

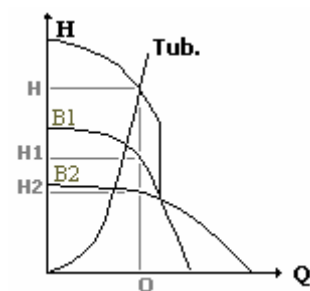
Hay que construir la curva compuesta conjunta, de modo que para cada altura conseguida, el caudal es la suma de los caudales de todas las bombas acopladas. Si una bomba no es capaz de suministrar más altura, al menos se dispone de la bomba que más altura es capaz de suministrar (parando la otra). Hay que tener en cuenta que el rendimiento individual de cada bomba debe aproximarse al óptimo.

Si las bombas son distintas, hay que tener cuidado al intentar arrancar la segunda bomba, ya que esta ha de ser capaz de suministrar una altura manométrica superior a la del punto de funcionamiento de la bomba en servicio.



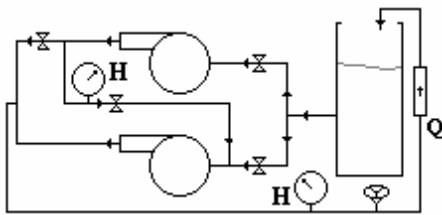
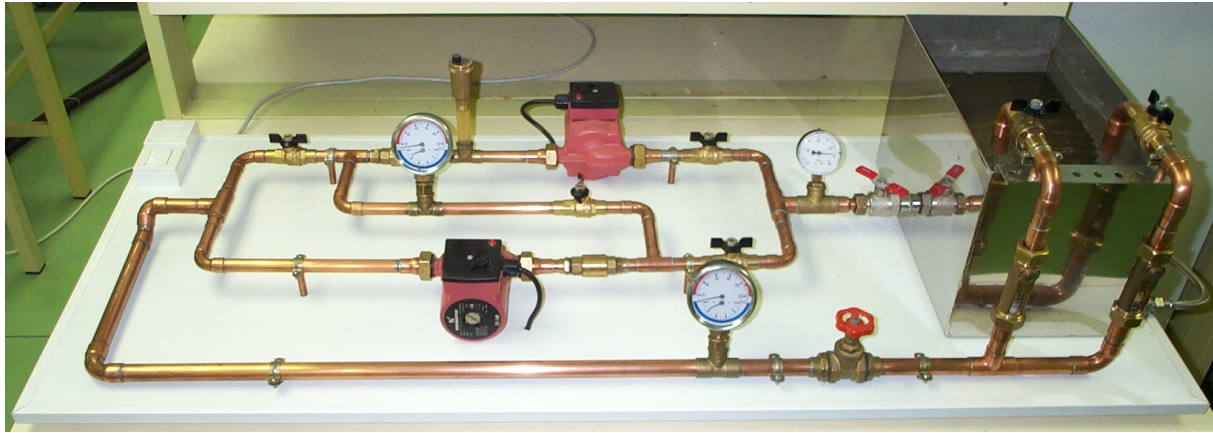
1.7.- Acoplamiento de bombas en serie

La curva compuesta conjunta se obtiene sumando para cada caudal la altura conseguida por cada bomba. Hay que tener en cuenta que si una bomba no es capaz de suministrar un determinado caudal, este tal vez se pueda conseguir con una sola bomba. En este caso la presión de aspiración de una bomba se corresponde con la de impulsión de la bomba anterior.



1.8.- Panel para ensayo de bombas en serie o en paralelo

En este panel se puede realizar el ensayo, obteniendo la curva característica, de una bomba centrífuga, para lo cual se puede variar el caudal suministrado por ella con el accionamiento de una válvula de compuerta que incrementa las pérdidas de carga de la tubería; las bombas instaladas presentan tres velocidades de giro diferentes, lo que permite hacer el ensayo para diferentes velocidades.



Manipulando convenientemente las válvulas de cierre, se puede realizar el ensayo de dos bombas en serie; además al tener la posibilidad de variar la velocidad de las bombas, se puede realizar el acoplamiento en serie de dos bombas diferentes. También se puede realizar el funcionamiento de bombas en paralelo, y ensayar el acoplamiento de las mismas, siendo estas diferentes (al variar la velocidad de giro).

1.9.- Bomba sumergible

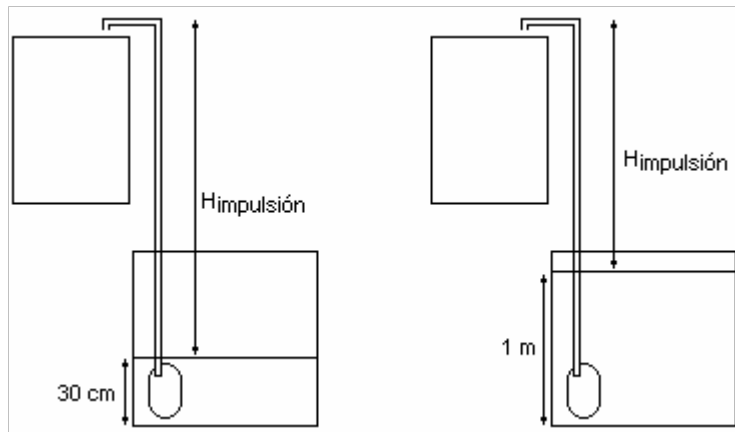
En el depósito auxiliar lateral del banco de ensayos de turbinas hidráulicas hay una bomba sumergible que envía el agua al depósito auxiliar superior (0,84 m²); con ella se puede comprobar cual es funcionamiento de las bombas sumergibles.

Para ello se la hace trabajar durante 1 minuto en dos casos:

- Primero estando sumergida unos 30 cm (hay que abrir las válvulas que conectan el depósito auxiliar lateral al principal para que el nivel de este se mantenga más o menos constante)
- Segundo, sumergiendo la bomba aproximadamente 70 cm.



De este modo se puede anotar cuanto es el caudal suministrado, comprobando que en el segundo caso es superior, ya que la altura que está venciendo la bomba es desde el nivel del depósito inferior, y no desde el punto donde está sumergida la misma.



Equivalencias de las distintas unidades de presión.

Kg/cm ²	Bar	kPa	m.c.a.	mm.Hg	psi
1	0,9806	98,0665	10,0002	735,5602	14,2233
1,019	1	100	10,197	750,062	14,503
0,0999	0,098	9,806	1	73,553	0,0193

1.10.- Datos de los ensayos realizados

En el laboratorio se debe proceder a **ensayar las bombas** del panel serie paralelo.

Bomba 1

Velocidad 1		Velocidad 2	
Q	H	Q	H

Bomba 2

Velocidad 1		Velocidad 2		Velocidad 3	
Q	H	Q	H	Q	H

Con estos datos se puede proceder a **dibujar las curvas** características de las bombas a todas las velocidades de cada una de ellas.

Con estos datos, se pueden **calcular y dibujar las curvas** características **que resultarían teóricamente de los acoplamientos** serie y paralelo.

Finalmente se deben **ensayar los acoplamientos** serie y paralelo de las bombas. Estas gráficas se deben **dibujar y comparar** con las obtenidas teóricamente.

Bombas serie.	Vel. B1:	Vel. B2:
	1	1
	H1	H2
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas serie.	Vel. B1:	Vel. B2:
	1	2
	H1	H2
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas serie.	Vel. B1:	Vel. B2:
	1	3
	H1	H2
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas serie.	Vel. B1:	Vel. B2:
	2	1
	H1	H2
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas serie.	Vel. B1:	Vel. B2:
	2	2
	H1	H2
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas serie.	Vel. B1:	Vel. B2:
	2	3
	H1	H2
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas Paralelo.	Vel. B1:	Vel. B2:
	1	1
	H	
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas Paralelo.	Vel. B1:	Vel. B2:
	1	2
	H	
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas Paralelo.	Vel. B1:	Vel. B2:
	1	3
	H	
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas Paralelo.	Vel. B1:	Vel. B2:
	2	1
	H	
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas Paralelo.	Vel. B1:	Vel. B2:
	2	2
	H	
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Bombas Paralelo.	Vel. B1:	Vel. B2:
	2	3
	H	
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		
Q =		

Se debe **ensayar** la bomba del **panel de cavitación** (es igual a la bomba 2 del panel serie paralelo), bajo dos condiciones:

- **Manteniendo fija la altura de impulsión;** $H_{\text{aspiración}} - Q$ para una $H_{\text{impulsión}}$ cte
- **Manteniendo fija la altura de aspiración;** $H_{\text{impulsión}} - Q$ para una $H_{\text{aspiración}}$ cte

Los ensayos se realizan únicamente para la velocidad máxima de la bomba 2 (Vel 3), y con los datos obtenidos se deben **dibujar las curvas, y compararlas** con las del ensayo de la bomba 2 (Vel 3), realizado anteriormente en el panel serie paralelo.

Bomba: Grundfos		H _{Impulsión} = m
		Q
H _{Aspiración} =		
H _{Aspiración} =		
H _{Aspiración} =		
H _{Aspiración} =		
H _{Aspiración} =		
H _{Aspiración} =		
H _{Aspiración} =		

Bomba: Grundfos		H _{Aspiración} = m
		Q
H _{Impulsión} =		
H _{Impulsión} =		
H _{Impulsión} =		
H _{Impulsión} =		
H _{Impulsión} =		
H _{Impulsión} =		
H _{Impulsión} =		

Realizar el **ensayo** de la bomba del panel de cavitación con una **temperatura de agua mayor**, con esto se puede comparar con el funcionamiento al variar la densidad del fluido.

T^a (___ °C)

Velocidad 3	
Q	H

Se debe **ensayar** dos veces **la bomba sumergible**, con 1 min de funcionamiento de la bomba y con el agua en el depósito inferior a 30, 50 y 70 cm; con ello se puede calcular y comparar el caudal impulsado al variar el nivel del depósito del que aspira.

Tiempo = 1 minuto	H inicial depósito superior	H final depósito superior	Caudal impulsado
Bomba sumergida 30 cm			
Bomba sumergida 50 cm			
Bomba sumergida 70 cm			

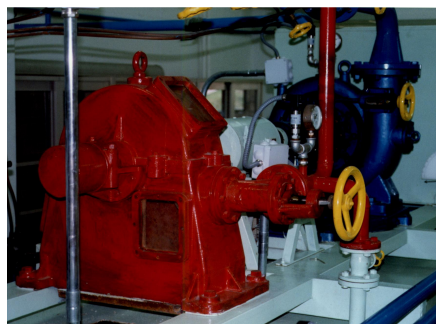
* El área del depósito superior es de 0,84 m²

*** La comparación de curvas no es únicamente su representación conjunta, sino la realización de los comentarios oportunos.**

2.- PRACTICA DE TURBINAS HIDRAULICAS

2.1.- Descripción y características del grupo hidráulico de ensayo

El Laboratorio de Energética del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética dispone de un grupo hidráulico del año 1965 para el ensayo de fluidos incompresibles. En lo referente al ensayo de las turbinas hidráulicas el grupo está compuesto por las siguientes piezas:



1. Un depósito principal de agua.
2. Una dinamo-freno de armazón oscilante y de excitación independiente de construcción SEL (controlada con un reóstato instalado en el cuadro de mandos). La energía producida es disipada por una resistencia de Cromo-Niquel. La tensión e intensidad generadas se miden directamente en el cuadro de mandos de la instalación. Posee un revelador de par instantáneo (en Kgm, mide el par de reacción sobre el estator) y transmisión de valores sobre instrumentos del cuadro en Kgm. Se puede acoplar mediante juntas a cualquiera de las dos turbinas hidráulicas.

Tipo 105 LD
Kw 15 / 220 Volt / 6,8 A
1500 giros en servicio continuo
Excitación comp Volt 220 190 Amp 0,35

3. Una turbina hidráulica Pelton de construcción CANTINI (de acción y tangencial) de eje horizontal, directamente conectada con la dinamo-freno mediante una junta acoplable. La turbina es de tipo de cucharas, regulación de aguja, mando con volante, la caja es de hierro colado con portezuelas transparentes sobre la tobera y las cucharas. La aguja de regulación es de A.I., el árbol es de acero montado sobre cojinetes de esferas.

Caída útil:	40 m
Caudal:	6 l/sg
Fuerza desarrollada:	2,2 CV
Giros por minuto	1500

4. Una electro-bomba centrífuga de elevada presión, para servir a la turbina Pelton. Es de construcción TRAVAINI tipo MCM 40201, tiene el cuerpo de hierro colado, los girantes de bronce y el eje de acero montado sobre soportes de esferas. Las bocas son de DN 40 (envío) y DN 65 (aspiración).

Caudal minuto:	350 – 500 lt
Presión manométrica total:	48 m en columna de agua
Giros por minuto:	2900 rpm
CV instalados:	10

El motor eléctrico trifásico está cerrado y autoventilado exteriormente.

La bomba posee un bypass, para controlar el caudal de alimentación a la turbina; a medida que este bypass se abre, disminuye el caudal de agua suministrado a la turbina.

Válvula para aumentar la pérdida de carga en la tubería de alimentación de la turbina, para controlar la altura disponible por la turbina; a medida que esta válvula se cierra se disminuye la presión puesta a disposición de la turbina.

-
5. Una turbina hidráulica Francis de construcción CANTINI (de reacción, radial y centrípeta) de eje horizontal, con cámara forzada en espiral; directamente conectada con la dinamo-freno mediante una junta acoplable. El distribuidor es del tipo FINCK con mecanismos exteriores montados sobre manguitos de bronce. Posee un tubo de aspiración, controlando su función al aumentar o disminuir el nivel de agua del depósito principal donde descarga la turbina.

Caída útil:	16 m columna de agua
Caudal:	17 l/sg
Fuerza desarrollada:	2,5 CV
Giros por minuto	1680

6. Una electro-bomba centrífuga de baja presión para alimentar a la turbina Francis. Es de construcción TRAVAINI y tiene el cuerpo de hierro colado, la girante de bronce y el eje de acero, montado sobre soportes de esferas. Las bocas son de DN 65 (envío) y DN 80 (aspiración).

Caudal minuto:	1000 – 1400 lt
Presión manométrica total:	23,5 - 20 m en columna de agua
Giros por minuto:	2900 rpm
CV instalados:	10

El motor eléctrico trifásico está cerrado y ventilado exteriormente.

La bomba posee un bypass, para controlar el caudal de alimentación a la turbina; a medida que este bypass se abre, disminuye el caudal de agua suministrado a la turbina.

Válvula para aumentar la pérdida de carga en la tubería de alimentación de la turbina, y con ello controlar la altura disponible por la turbina; a medida que esta válvula se cierra se disminuye la presión puesta a disposición de la turbina.

7. Un cuadro de mandos y control, instrumentos de medición.
- Interruptor general;
 - Interruptores sobre las bombas;
 - Mandos de pulsación luminosos;
 - Reóstato de excitación de la dinamo;
 - Dispositivo de sobrevelocidad de las turbinas, cortan el suministro eléctrico de las bombas que las alimentan, este dispositivo impedirá llevar a la turbina al embalamiento.
 - El cuadro contiene dos instrumentos indicadores de caudal de gran diámetro (dos vénturis instalados sobre las tuberías de alimentación de las turbinas; El medidor de caudal conectado a la tubería DN 40 que alimenta la turbina Pelton es de construcción GUARDIGLI, está graduada el cuadrante desde 0 a 7 l/seg. El medidor de caudal conectado a la tubería DN 80 que alimenta la turbina Francis es de construcción GUARDIGLI, está graduado el cuadrante desde 0 a 18 l/seg.
 - Dos indicadores de presión manométrica (estos no están en el cuadro sino a la entrada de cada una de las turbinas);
 - Un indicador de revoluciones, instalado en la dinamo (esta posee las mismas revoluciones que las turbinas);
 - Voltímetro y amperímetro medidores de la generación de la dinamo;
 - Instrumento de medida del par generado por la dinamo;
 - Sobre la base del cuadro metálico están colocadas las resistencias para la disipación de la energía producida por la dinamo.
 - El manómetro diferencial instalado sobre el cuadro de mando y control en paralelo con los dos medidores de caudal de cuadrante y conmutable con el uno o el otro, por medio de pequeños tubos flexibles está graduado desde 0 a 300 mm Hg.

8. Un sistema de medición y registro de datos, que consta de un ordenador con soporte informático y una tarjeta de adquisición de datos de los sensores de:
- A. Caudal; dos sensores de caudal, uno en la tubería de alimentación de la turbina Pelton y el otro en la de alimentación de la Francis.
 - B. Presión hidráulica; dos sensores de presión hidráulica, uno en entrada de la turbina Pelton y el otro en la entrada de la Francis.
 - C. Sensor de par generado en la dinamo.
 - D. Un sensor de velocidad de giro acoplado en el eje de la dinamo.
 - E. Un medidor de tensión generada por la dinamo.
 - F. Un sensor de intensidad generada por la dinamo.

2.2.- Introducción al ensayo de turbinas

Los ensayos se pueden realizar para diferentes aperturas de distribuidor (T Francis) o del inyector (T. Pelton). Los resultados se anotarán en un tabla del siguiente formato:

	TURBINA						DINAMO FRENO					GRU.	DISTR.
	Q (l/sg)	H (mH ₂ O)	N _t (CV)	M (kgm)	n (rpm)	N _E (CV)	η _t	V (Vol)	I (Amp)	N _D (CV)	η _D	η _T	Aper
1													
2													

Donde Q es el caudal de agua, H la altura en columna de agua, N_t la potencia absorbida por la turbina, M el par de la turbina, n la velocidad de giro de la turbina, N_E la potencia en el eje de la turbina, η_t el rendimiento de la turbina, V la tensión generada en la dinamo, I la intensidad cedida por la dinamo, N_D la potencia de la dinamo, η_D el rendimiento de la dinamo, η_T el rendimiento total y Aper el tanto por ciento de apertura del distribuidor o el inyector.

Hay que tener en cuenta que las columnas de Q, H, M, n, V e I son de lectura directa de los sensores (o el ordenador). Las restantes columnas son de cálculo y se emplean las siguientes fórmulas para ello:

$$N_t = Q \times H / 75 \text{ (CV)} \quad N_e = M \times n / 716 \text{ (CV)} \quad N_D = V \times I \times 0,00136 \text{ (CV)}$$

$$\eta_t = N_e / N_t \quad \eta_D = N_D / N_e \quad \eta_T = \eta_t \times \eta_D$$

2.3.- Modo de funcionamiento y proceso operativo del banco

Como el modo de obtener el salto hidráulico de las turbinas es alimentándolas con las bombas centrífugas (la bomba de alta presión para la turbina Pelton, y la de baja para la Francis), hay que asegurarse que el nivel de **agua** en el depósito principal es suficiente para el funcionamiento correcto de estas y abrir las válvulas correspondientes a la bomba asociada a la turbina a ensayar (y cerradas las válvulas de otros ensayos).

El cebado de las bombas de la instalación no es un problema, ya que están situadas en el nivel más bajo y siempre están cebadas (salvo que la instalación se arranque con muy poco agua en el depósito).

La cavitación en las bombas tampoco es un problema en esta instalación, ya que la pérdida de presión sufrida por el agua a la entrada del rodete no es suficiente para que el agua se vaporice, ya que, además de trabajar con agua fría, el nivel del depósito de agua es superior al nivel de la bomba.

Hay que acoplar la **dinamo** a la turbina que se desee ensayar y asegurarse que esta de desacoplada de la otra turbina.

Hay que fijar la **apertura** del inyector (T. Pelton) o distribuidor (T. Francis) a la que se desee realizar el ensayo.

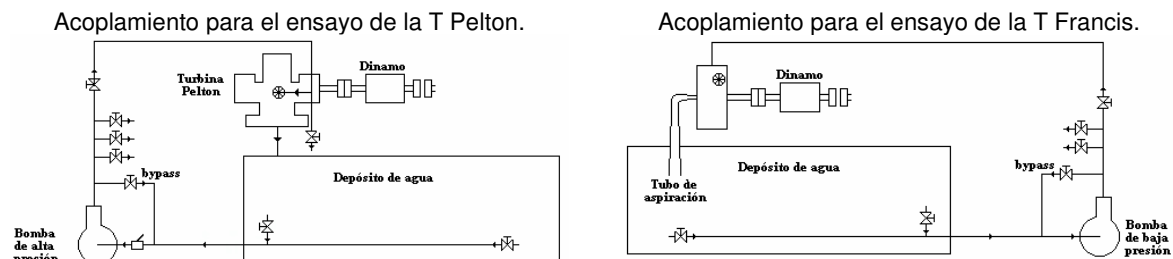
Si se quiere ensayar la turbina Francis, hay que tener en cuenta que para que el **tubo de aspiración** cumpla su misión, el nivel de agua en el depósito principal, donde descarga el agua de la turbina, debe sobrepasar en altura la salida del tubo; si se vacía parcialmente el depósito de agua, dejando la salida del tubo al aire, se deja sin efecto el tubo de aspiración. La presencia del tubo de aspiración puede crear problemas de cavitación en la turbina.

Para facilitar más el arranque de las bombas en la instalación del laboratorio se dispone de un **bypass** de accionamiento manual, mediante el cual es posible cortocircuitar hidráulicamente la aspiración y la impulsión de la bomba, para que el arranque de la misma se pueda producir sin carga.

En el cuadro de mandos están los **automáticos generales**.

Para que la turbina no arranque sin carga hay que **excitar la dinamo**; en el cuadro de mandos existe un pulsador para alimentar la excitación de la dinamo, y un reóstato para controlar esta.

En el cuadro de mandos están los automáticos generales, y los pulsadores de **arranque y parada de las bombas centrífugas**.



La instalación del laboratorio tiene un dispositivo **antiembalamiento**, de manera que si la velocidad de las turbinas es excesiva detiene la alimentación eléctrica de la bomba, cortando el caudal de agua hacia la turbina e impidiendo que esta se embale. El rearme de la instalación cuando salta el dispositivo antiembalamiento es manual mediante un pulsador instalado en el cuadro de mandos.

Cuando estén hechas todas estas comprobaciones, se puede poner en marcha la electrobomba correspondiente. Si se desea utilizar el sistema de medida y registro por **ordenador** para ensayos de las turbinas hidráulicas, es preciso encender la **tarjeta** de adquisición de datos, el ordenador y abrir el **programa** correspondiente.

Los **diferentes ensayos** se realizan para n , H , u otra variable constante y variando otras variables. Esto se puede conseguir regulando el **reóstato** de la dinamo y las **válvulas de bypass e impulsión** de la bomba.

En la turbina Pelton, al variar la excitación de la dinamo no se modifican ni el caudal ni altura en la turbina, esto es debido a que la velocidad de giro del conjunto dinamo-turbina no afecta a la bomba de alimentación, la pérdida de carga que implica el rodete no es "vista" por la bomba; pero en la turbina Francis al variar la velocidad de giro del conjunto dinamo-turbina al modificar la excitación de la dinamo, se cambia el régimen de funcionamiento de la

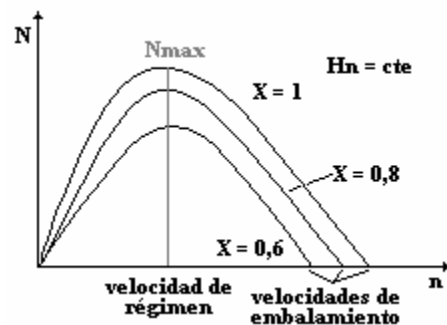
bomba de alimentación, y se modifican tanto el caudal como la altura a disposición de la turbina, ya que la pérdida de carga que se produce en el rodete es "vista" por la bomba.

2.4.- Curvas características de las turbinas

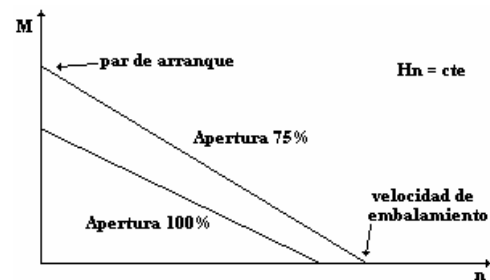
Las curvas características de las turbinas han de caracterizar el comportamiento de la turbina para todas las posibles condiciones de trabajo, que viene determinadas por la variabilidad del salto, de la carga, de la velocidad,...

Estas curvas han de ser para cada grado de apertura del distribuidor o el inyector (X). Es conveniente conocer el diámetro del rodete con el objeto de referir los resultados a ruedas del mismo tipo pero de diferentes tamaños aplicando las leyes de semejanza.

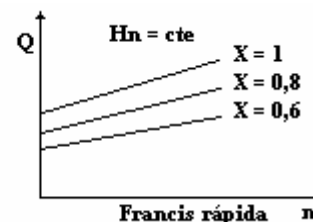
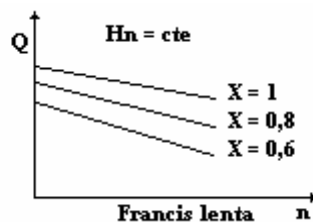
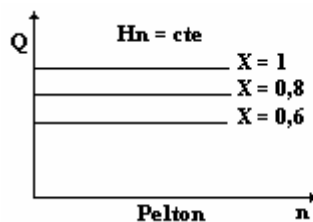
- Las **curvas de potencia ($N_t = f(n, X)$) para salto constante**; parten del origen, tienen forma parabólica y tienen el máximo en la misma velocidad. Los puntos de corte con el eje de velocidad corresponden con la **velocidad de embalamiento**.



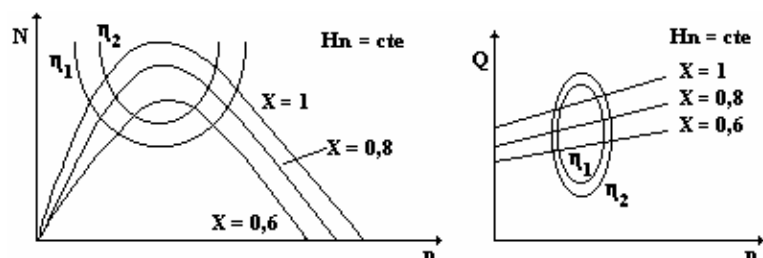
- Las **curvas de par motor ($M = f(n, X)$) para salto constante**; son rectas, siendo la ordenada en el origen el **par de arranque** y la abscisa de ordenada nula la **velocidad de embalamiento** (coincidente con el valor de la anterior curva). El par de arranque en las turbinas (excepto en la de hélice) es del orden del doble que el de régimen nominal, lo que permite el arranque en carga.



- Las **curvas de caudal ($Q = f(n, X)$) para salto constante**; son rectas; para las Pelton son horizontales, y para las Francis la inclinación depende de la velocidad de la turbina, para las lentas son decrecientes, mientras que para las rápidas son crecientes.

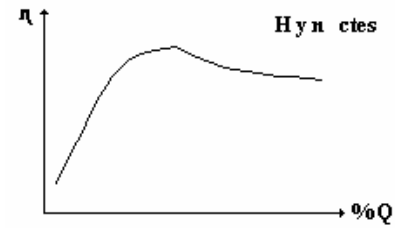


- Las **curvas en colina**; se trabaja para diferentes aperturas del distribuidor o el inyector, se trata de obtener **sobre las curvas $Q = f(n, X)$ y $N_t = f(n, X)$ para salto constante los puntos de rendimiento constante**, las llamadas colinas de rendimiento, para ello se superponen los dos diagramas. En los diagramas se puede observar la forma que toman estas colinas.



Normalmente las turbinas se acoplan a un generador síncrono, por lo que la velocidad de giro ha de ser constante, lo que hace, como es lógico, más ideal aquella turbina en la que podamos variar el Q manteniendo fija n sin afectar al rendimiento.

- **Curvas de rendimientos;** las turbinas normalmente están acopladas a un **generador síncrono, y** han de suministrar en cada instante la potencia que este exige, **manteniendo** n constante, por lo que resulta interesante estudiar las **variaciones del η_t** o al variar la potencia o el caudal manteniendo **constantes H y n**. La variación de caudal se hace variando la admisión (X) del distribuidor o el inyector.



Las **limitaciones del banco de ensayos** son por una parte que el dispositivo **antiembalamiento** impedirá obtener puntos a velocidades elevadas, ya que en esta situación cortará la alimentación de agua a las turbinas parando el funcionamiento de las bombas; y por otra parte, en condiciones normales de funcionamiento, la **carga** ofrecida por la **dinamo** no es capaz de frenar suficientemente la turbina para que esta funcione a velocidades reducidas.

2.5.- Estudio de semejanza

Este estudio consiste en determinar n, Q, N_t ,... en una turbina semejante a la ensayada cuyo rodete tenga un metro de diámetro, una altura de H = 1m, y cuyo rendimiento sea igual (TURBINA UNIDAD).

$$n_{11} = (n' \times D_2') / \sqrt{Hn'}$$

$$Q_{11} = Q' / (D_2'^2 \sqrt{Hn'})$$

$$N_{11} = N' / (D_2'^3 \sqrt{Hn'^3})$$

$$C_{11} = C' / (D_2'^3 \times Hn')$$

Los valores ' son los del ensayo del modelo, y los valores $_{11}$ los correspondientes reducidos.

Una de las características más importantes de las turbinas es su **velocidad específica** (n_s), debiendo tener en cuenta que todas las turbinas geoméricamente semejantes tienen el mismo n_s .

$$n_s = n \text{ Ne}^{1/2} H^{-5/4}$$

2.6.- Programas para los ensayos

Dentro del sistema informático existen dos programas:

- El primero de los programas (TURBINA) captura los valores instantáneos de las variables medidas por los sensores, los almacena y los representa en curvas en función del tiempo o en función de una variable frente a otra; pero no caracteriza la turbina, ya que toma datos en valores transitorios de altura, caudal, apertura del inyector, ...; de él se pueden tomar valores para representar las curvas características.
- El segundo programa (TH CURVAS) presenta más opciones, entre otras:
 - Utiliza el programa TURBINA para la adquisición de datos y crear una base de datos, en la que además se almacene el % de apertura del inyector o distribuidor.
 - Con esta base de datos es capaz de representar las curvas características de las turbinas. Estas curvas en realidad son puntos, y la curva es una aproximación de estos

puntos, para algunas curvas no hay puntos o los existentes pueden resultar escasos para interpretar los resultados, o pueden estar en un rango de valores muy pequeño con lo que no se puede caracterizar la turbina en determinadas condiciones..

2.7.- Toma de datos manual

	TURBINA						DINAMO FRENO				GRU.	DISTR.	
	Q (l/sg)	H (mH ₂ O)	N _t (CV)	M (kgm)	n (rpm)	N _E (CV)	η _t	V (Vol)	I (Amp)	N _D (CV)	η _D	η _T	Aper
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													

$$N_t = Q \times H / 75$$

$$N_D = V \times I \times 0,00136$$

$$\eta_D = N_D / N_e$$

$$N_e = M \times n / 716$$

$$\eta_t = N_e / N_t$$

$$\eta_T = \eta_t \times \eta_D$$

Con apertura fija del distribuidor, construir las curvas :

$$Q = f(n)$$

$$N_e = f(n)$$

$$\eta_t = f(n)$$

Con apertura variable del distribuidor, construir las curvas:

$$Q = f(n)$$

$$\eta_t = f(n)$$

y construir las colinas del rendimiento

Variando el caudal y la excitación, controlar las revoluciones constantes y realizar las curvas Q-h, Q-M, , ...

2.8.- Curvas obtenidas informáticamente

A continuación se incluye alguna de las curvas que se pueden obtener mediante el programa TH CURVAS. El **comentario de alguna de ellas constituye parte de la práctica.**

