



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Título del proyecto:

DESARROLLO DE GUIONES DE PRÁCTICAS PARA LAS
ASIGNATURAS DEL ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS.

MEMORIA

Alumno: Esteban Santesteban Azanza

Tutor: José Javier Valencia Monreal

Pamplona, agosto de 2017











ÍNDICE

1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO.....	7
2. INTRODUCCIÓN	9
2.1. Laboratorio de mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.	9
2.2. Equipos utilizados en la realización de los guiones.....	10
3. METODOLOGÍA DOCENTE DE LOS GUIONES.....	15
4. GUIONES DE PRÁCTICAS.....	17
4.1. Estudio experimental de una turbina crossflow	18
4.2. Estudio experimental de una turbina Kaplan.....	62
4.3. Cavitación en una bomba centrífuga	113
5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	139
6. BIBLIOGRAFÍA	141





1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO

El presente Proyecto Fin de Carrera se ubica dentro de la rama de Mecánica de Fluidos y se caracteriza principalmente por la realización de ensayos en el laboratorio. Tiene como objetivo la realización de una serie de guiones de prácticas relacionadas con el área de Mecánica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales de la Universidad Pública de Navarra. Dichos guiones de prácticas tienen prevista su utilización en los nuevos Grados en Ingeniería Mecánica y en Tecnologías Industriales.

En la actualidad existen una serie de guiones de prácticas que se llevan empleando desde hace ya varios años. Por ello, en el presente Proyecto Fin de Carrera se llevará a cabo la tarea de mejora y actualización de los guiones ya existentes, en la asignatura Ingeniería de Fluidos y en Máquinas y Sistemas Fluidomecánicos.

Las prácticas de laboratorio, especialmente en el caso de carreras técnicas son herramientas de estudio que hacen de puente entre los conceptos más teóricos que se ven en las clases de teoría y las aplicaciones más prácticas que se pueden desarrollar durante el ejercicio profesional. Estas dos facetas, la teórica y la práctica son fundamentales e indispensables durante el proceso de formación académica de los alumnos y por ello, dichas prácticas deben responder a las siguientes necesidades. Ofrecer la posibilidad de manipular, ensayar y trabajar con distintos equipos, bombas, turbomáquinas, herramientas y útiles del área de la mecánica de fluidos. Proporcionar series de medidas y de datos, para organizar en tablas y gráficas para una posterior evaluación y estudio. Facilitar fórmulas y recursos teóricos que ayuden a comprender el desarrollo práctico. Y por último, dar la posibilidad de llegar a conclusiones que ayuden a comprender las experiencias realizadas y las turbomáquinas ensayadas.

Por tanto, este proyecto busca realizar unos guiones que compartan una misma estructura, que mantengan el rigor teórico, matemático y lingüístico propio de las ingenierías, y a su vez que sean claros y sencillos de comprender por parte del alumno. Además, con estos guiones se pretenden reforzar los conocimientos aprendidos en clase, incluyendo fundamentos teóricos que ayuden a una mejor comprensión de las prácticas y faciliten su realización tanto en los laboratorios como fuera de ellos. Continuando con esta idea se van a incluir fotografías actuales de los equipos y esquemas, todo ello dirigido a una motivación adicional para el alumno, una presentación estética y moderna, y una visualización general del desarrollo de la práctica.



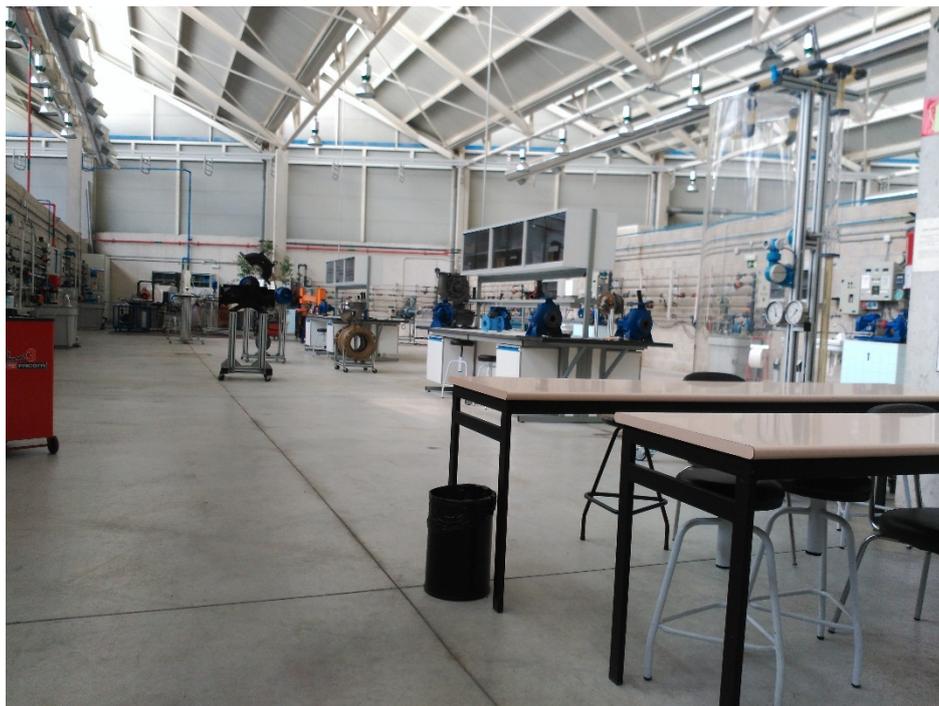
Los guiones que se van a realizar tratarán de estudiar algunos de los dispositivos más relevantes de la mecánica de fluidos, como las turbinas Banki y Kaplan, las bombas centrífugas, etc. y fenómenos como la cavitación o las pérdidas en la tubería de aspiración, entre otros. En su desarrollo, cada práctica será realizada en el laboratorio de mecánica de fluidos de la zona de talleres. Se tomarán los datos obtenidos y con ellos se desarrollará una sección en la que se incluirán los resultados pedidos al alumno. Esta sección servirá de guía al profesor a la hora de realizar las prácticas y de corregir los guiones entregados por los alumnos.

2. INTRODUCCIÓN

Como el presente proyecto ha sido llevado a cabo gracias a las instalaciones, laboratorios y equipos de la Universidad Pública de Navarra, se ha considerado ineludible hacer una mención especial de estos dos aspectos.

2.1. Laboratorio de mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.

Este laboratorio está situado en el edificio de Talleres de la Universidad Pública de Navarra, más concretamente entre el Taller de Máquina Herramienta y el Laboratorio “Carlos Sopena” de Motores Térmicos. Cuenta con tres zonas: una zona didáctica junto a la entrada con mesas, sillas y una pizarra, para explicar los fundamentos teóricos de las prácticas; una sala reservada para el técnico del laboratorio; y, por último, el resto del laboratorio, que está dedicado a los equipos con los que se realizarán las prácticas.



Este laboratorio tiene un gran número de equipos, entre los que se encuentran dos turbinas Pelton, dos Francis, dos Kaplan, una Turgo y una Banki, dieciséis bombas centrífugas, de las cuales ocho están operativas y otras ocho se emplean en la práctica de montaje y desmontaje, 2 bancos de ensayos del golpe de ariete, varias muestras de equipos en exposición, un ventilador etc.

2.2. Equipos utilizados en la realización de los guiones.

1. Turbina Banki.

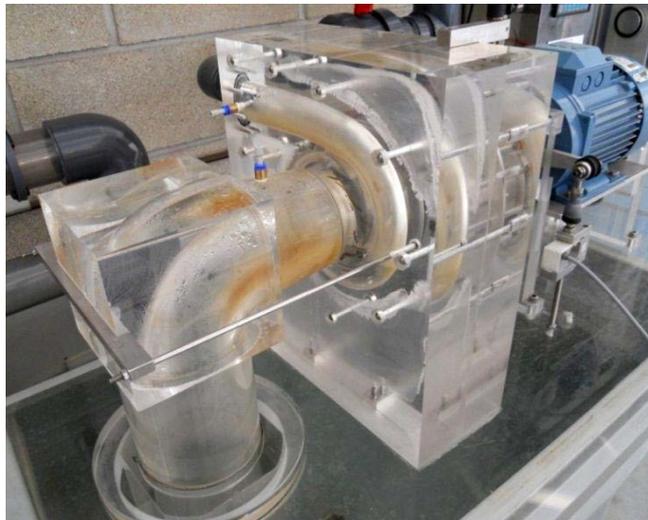
La turbina Crossflow es clasificada como una turbina de acción, es decir, la energía potencial que posee el flujo de agua al entrar en la turbina se transforma en energía cinética y de presión íntegramente en el inyector. Se utiliza para saltos entre 5 y 200m. Se considera también de doble impulsión y de admisión parcial. Se trata de una turbina versátil que puede operar en un amplio rango de caudales manteniendo un rendimiento aceptable. Es una



turbina lenta cuya velocidad de operación para un rendimiento aceptable está entre las 400 y las 700 rpm. Una de las características principales de esta turbina es que el agua entrega dos veces energía al rodete al atravesarlo radialmente.

2. Turbina Kaplan.

Se trata de una turbina de reacción de flujo axial que se adapta a grandes caudales y pequeñas alturas, siendo utilizada para saltos de entre 4 y 80 m y velocidades específicas entre 200 y 900. Consta de una cámara espiral y un distribuidor que conducen el agua hasta el rodete, órgano donde se realiza el intercambio de energía entre el agua y la máquina. Esta turbina permite la regulación y la orientación de los álabes del rodete. Por eso se las suele



llamar de doble regulación, debido a que puede variarse tanto el caudal de entrada de agua como el ángulo de las palas del rodete, adaptándose muy bien a cualquier carga y permitiendo obtener siempre el máximo rendimiento. A la salida del rodete el agua es conducida al depósito a través del tubo de descarga.

3. Bomba centrífuga.

Se trata de una bomba centrífuga de una etapa, de eje horizontal, con impulsión radial y aspiración axial. El motor está separado y acoplado a la bomba. Su velocidad nominal es 1450 y 1000 rpm. En este tipo de bombas, el flujo pasa por el rodete, donde gana energía tanto de presión como de velocidad y descarga en la cámara espiral, llamada también voluta o caracol, saliendo de ésta por la tubería de impulsión. Todo este proceso permite elevar el fluido con que se trabaja una determinada altura, en nuestro caso $H_{m\acute{a}x} \approx 22$ m.



4. Cuadro de tuberías.

El cuadro de tuberías es la instalación más importante que se dispone en el laboratorio, ya que en él se realizan la mayor parte de las prácticas. Cuenta con cinco tuberías paralelas, una de aspiración que recoge el agua de un tanque y cuatro de impulsión, dos de las cuales tienen diámetros diferentes. En este equipo se tienen varios elementos para la realización de diferentes prácticas: un codo a 90° con tomas de presión, una válvula de diafragma, una válvula de mariposa, dos válvulas de bola, una válvula de pie, un Venturi, un caudalímetro, un manómetro, un vacuómetro, y varias tomas donde colocar los manómetros diferenciales.



5. Válvula de mariposa.

La válvula de mariposa consta de un disco montado sobre un eje que, al cerrarse, se apoya en un anillo circular cerca de la superficie del conducto, sellando el mismo. Un simple giro de 90° abre por completo la válvula, por lo que este diseño es perfecto para válvulas de control de cierre y apertura rápidos. Sin embargo, se necesita aplicar momentos importantes para cerrar las válvulas, y las pérdidas son muy elevadas cuando la válvula está casi cerrada. Las válvulas de mariposa pueden estar preparadas para admitir cualquier tipo de fluido gas, líquido y hasta sólidos.



Las válvulas de mariposa pueden estar preparadas para admitir cualquier tipo de fluido gas, líquido y hasta sólidos.

6. Válvula de diafragma.

Las válvulas de diafragma se utilizan para el corte y estrangulación de líquidos que pueden llevar una gran cantidad de sólidos en suspensión. En este tipo de válvulas se aísla el fluido de las partes del mecanismo de operación. Esto las hace idóneas en servicios corrosivos o viscosos, ya que evita cualquier contaminación hacia o del exterior. La estanqueidad se consigue mediante una membrana flexible, generalmente de elastómero, pudiendo ser reforzada con algún metal, que se tensa por el efecto de un eje-punzón de movimiento lineal, hasta hacer contacto con el cuerpo, que hace de asiento.



La estanqueidad se consigue mediante una membrana flexible, generalmente de elastómero, pudiendo ser reforzada con algún metal, que se tensa por el efecto de un eje-punzón de movimiento lineal, hasta hacer contacto con el cuerpo, que hace de asiento.

7. Caudalímetro electromagnético.

Es un dispositivo que se emplea para la medición del caudal que fluye por una conducción. Está basado en la ley de Faraday. Cuando el agua atraviesa de forma perpendicular el campo magnético del caudalímetro, se induce una tensión al medio que es proporcional a la velocidad del flujo media, y que es captada por dos electrodos. Entre sus ventajas está que es un sistema sin partes móviles, no ocasiona ninguna restricción en la circulación y por lo tanto la pérdida de carga es irrelevante, y es posible su empleo con fluidos corrosivos o con sólidos en suspensión.



8. Manómetro diferencial.

El manómetro diferencial mide la diferencia de presiones entre dos puntos. En el caso de que uno de los puntos esté a presión atmosférica, se medirán presiones relativas. El manómetro diferencial consiste en dos cámaras separadas por una membrana. El desplazamiento de esta membrana debido a la diferencia de presiones entre las dos cámaras será reflejado en el display en forma de presión.



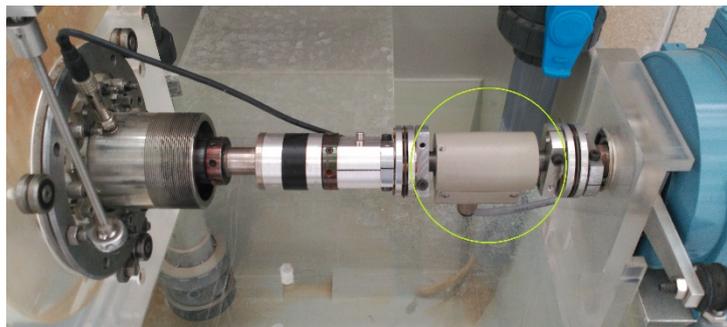
9. Célula de carga.

La célula de carga es un dispositivo que se emplea para medir fuerzas y/o momentos de fuerzas. En nuestro caso, para medir el par o momento de fuerzas que transmite el eje de la turbina o de la bomba, se coloca el motor eléctrico coaxial a la bomba o la turbina sobre un columpio cuyo eje de oscilación coincide con el eje del motor. El par que la bomba o la turbina ejerce sobre el motor es exactamente igual al que hay que hacer sobre el columpio para que éste no cambie en su posición angular, y este par se obtiene midiendo una fuerza y multiplicándola por su distancia al eje. La fuerza la medimos con la célula de carga, y como la distancia de la línea de acción de la fuerza al eje es una constante, en el indicador aparece el producto de fuerza por distancia, es decir, el par o momento de fuerzas.



10. Transductor de par.

El transductor de par es otro dispositivo que se emplea para medir fuerzas y/o momentos de fuerzas. El aparato sencillamente mide el par torsor al que está sometido el eje de la bomba o de la turbina correspondiente mediante la elongación de galgas extensiométricas.



11. Tacómetro MIGHTY - 1C

Un tacómetro es un dispositivo que se utiliza para medir la velocidad de rotación de un eje. En nuestro caso el tacómetro es de tipo inductivo y consiste en una rueda dentada solidaria al eje, y un sensor que detecta el paso de cada diente. Con el número de dientes de la rueda dentada y el número de dientes detectados en un tiempo determinado, el tacómetro nos indica de forma directa el régimen de giro en rpm.





3. METODOLOGÍA DOCENTE DE LOS GUIONES

Los guiones de prácticas han sido desarrollados para ser una herramienta más en la formación académica de los alumnos y son el puente que une el conocimiento teórico y el práctico. Por ello deben ser claros y sencillos de comprender por parte del alumno, aunque manteniendo el rigor teórico, matemático y lingüístico propio de las ingenierías. Para conseguir estos objetivos, los guiones de prácticas tienen una estructura común que sigue un orden lógico. El orden de los apartados que se explican a continuación no es estrictamente el mismo en todas las prácticas, ya que se han adaptado a las características de cada una y a la maquetación que mejor organizase el espacio.

En primer lugar, se enumeran los objetivos que se persiguen con la realización de la práctica. De este modo se da un primer esbozo del desarrollo de la misma y se establece la meta a conseguir, de modo que a la hora de seguir los diferentes pasos se tenga claro hacia dónde están encaminados, otorgando coherencia al conjunto.

En segundo lugar, se encuentran los fundamentos teóricos. Son los conocimientos que se necesitan para entender la práctica y poder realizarla correctamente. En general, esta teoría ya se habrá visto en clase, pero no está de más recordarla. Además, en ocasiones se incluye información adicional y fotografías reales de los equipos y al mismo tiempo supone agilizar el estudio, evitando al alumno tener que buscar la información referida a la práctica en el libro o los apuntes, mejorando así la organización del material de estudio.

A continuación, se muestra un esquema del montaje experimental. En él se muestran los componentes del equipo, sus dimensiones, y cómo debe ser montado o preparado para proceder a la realización de la práctica. En algunos de estos esquemas se incluye además el montaje correcto de los aparatos de medida.

Seguidamente, se aporta el desarrollo analítico con las fórmulas matemáticas necesarias para realizar los cálculos y obtener los resultados pedidos. Se parte de ecuaciones generales y se desarrollan paso a paso hasta obtener la ecuación final, en la que basta con introducir los valores obtenidos experimentalmente para encontrar el valor de la variable pedida. De este modo el alumno ve el proceso seguido y comprende el porqué de la expresión final. En ocasiones este apartado se ha incluido dentro del de fundamentos teóricos, ya que se consideró que de este modo quedaba mejor estructurado el guión.



En varias prácticas aparece como un apartado independiente o como parte de otro, el procedimiento que se debe seguir para una toma de datos adecuada. Basándonos en nuestra propia experiencia se dan las pautas necesarias para que el tiempo de realización de la práctica no sea excesivo y para que el número de datos recogidos sea el justo y necesario para obtener unos resultados correctos y concluyentes. En aquellos guiones en los que no aparece este apartado, se debe a la sencillez y rapidez de la toma de datos.

Finalmente se describe el trabajo a realizar. En este último apartado se detalla el trabajo que debe hacer el alumno tanto en el laboratorio como en casa y que posteriormente deberá entregar para que pueda ser evaluado. En general consiste en rellenar las tablas de datos con los valores medidos experimentalmente y con los obtenidos después a partir de los primeros; dibujar las gráficas correspondientes a partir de los valores calculados anteriormente e incluir una valoración de la práctica con los comentarios y conclusiones debidos. En la mayor parte de las prácticas se incluyen ejemplos de las gráficas a realizar por los alumnos para dar una idea general del resultado que se debe obtener. En algunas prácticas se pedirá además el cálculo de algunas variables importantes características del equipo utilizado y que servirán para un análisis del mismo más detallado.



4. GUIONES DE PRÁCTICAS

A continuación, se presentan los guiones de prácticas de las asignaturas referidas al área de mecánica de fluidos que se desarrollan en este proyecto. Al final de cada práctica se exponen los resultados obtenidos en el laboratorio, así como las gráficas y conclusiones a las que deberían llegar los alumnos para que sirvan de apoyo al profesor y le ayuden en la corrección de los guiones.

Los guiones de prácticas que reúne este proyecto fin de carrera son los siguientes:

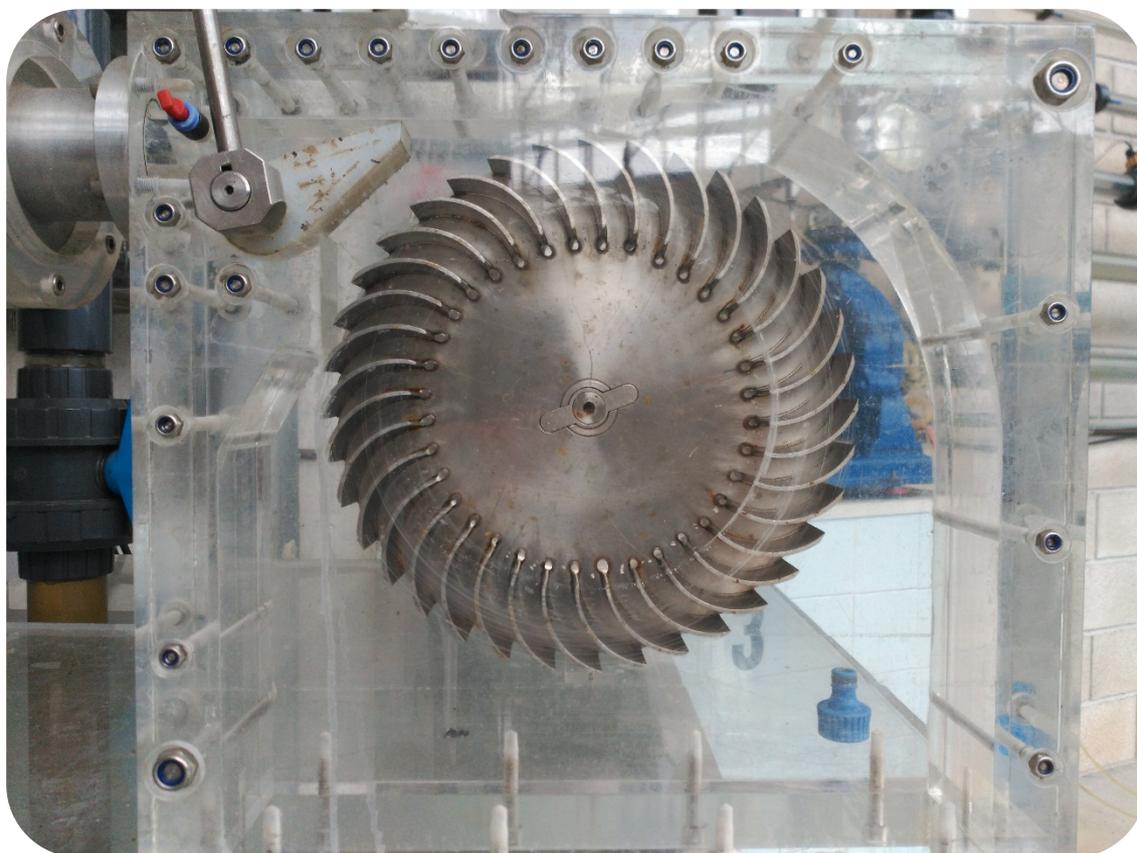
Práctica1: Estudio experimental de una turbina Crossflow.

Práctica2: Estudio experimental de una turbina Kaplan.

Práctica3: Cavitación en una bomba centrífuga.

PRÁCTICA 1

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA CROSSFLOW



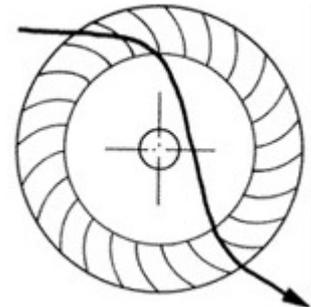
OBJETIVOS

- Deducir experimentalmente las curvas del rendimiento total de la turbina (η_t) en función de la velocidad n (r.p.m.) para diversos grados de apertura del inyector, con la altura neta constante en el entorno de $H = 17$ m. El salto de agua lo simularemos con una bomba centrífuga, en un circuito cerrado.
- Dibujar las curvas de isorrendimientos, “colinas de rendimiento” (considerando el rendimiento total) en un diagrama (n , Q) para una altura neta uniforme de $H = 17$ m.
- Determinar los diversos coeficientes de velocidad y a qué velocidad debe girar la turbina para obtener el máximo rendimiento, para diversos caudales y altura neta constante de 17 m.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Funcionamiento de la turbina Crossflow

La turbina Crossflow es clasificada como una turbina de acción, es decir, la energía potencial que posee el flujo de agua al entrar en la turbina se transforma en energía cinética y de presión íntegramente en el inyector. Se considera también de doble impulsión y de admisión parcial.



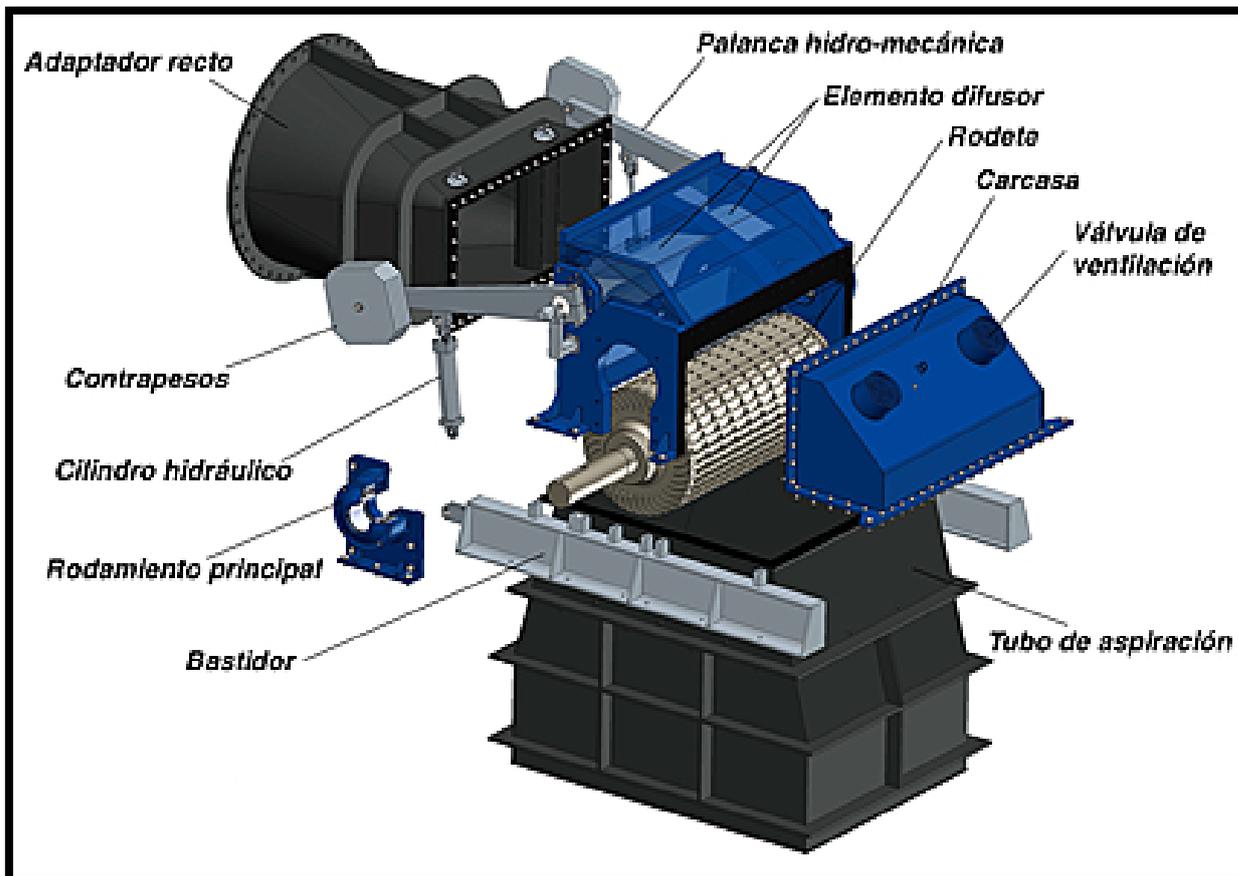
El agua en una turbina de flujo cruzado pasa a través del rodete de forma transversal y solo de forma parcial. La geometría de la turbina busca que el chorro de agua sea efectivo, la admisión del agua se produce en el perímetro exterior del rodete y es conducida mediante los álabes hacia el interior de este, de forma que choca en su salida con los álabes del lado opuesto. Este doble choque del agua contra los álabes del rotor implica la entrega de un trabajo adicional y una mejora de la eficiencia. No obstante, casi toda la energía se transmite en la primera pasada y solo un tercio del trabajo se efectúa en la segunda.



Las turbinas de flujo transversal se suelen construir como turbinas de diferente capacidad que comparten un mismo eje. De este modo, se consigue una graduación continua del caudal dentro de la división 1/3-2/3-3/3, de la longitud total del rodete, si este está dividido en tres partes iguales, o de 1/4-1/2-3/4-4/4, si está dividido en cuatro.

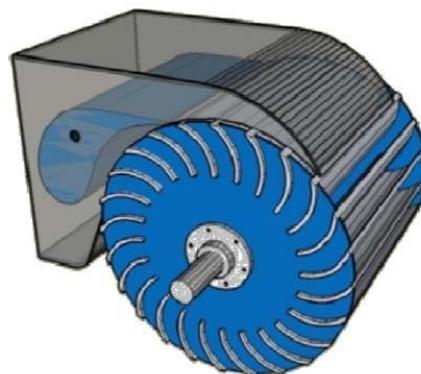
Componentes de la Turbina Crossflow

La turbina Crossflow consta de varios componentes que se muestran a continuación. Seguidamente se detallan las características y funcionalidades de algunos de los más importantes.



Adaptador recto: Este componente se encarga de conducir el flujo de agua hacia el difusor. Se trata de una tubería que pasa de una sección circular a una rectangular más adecuada para la regulación del caudal.

Elemento difusor y distribuidor: El sistema de regulación controla el flujo según la potencia deseada y el agua disponible. Esto se consigue, con el difusor que se abre o cierra para dejar pasar más o menos caudal. Este permite una graduación continua del caudal dentro de la división 1/3-2/3-3/3 en caso de rodete dividido en 3 partes iguales. El agua fluye hacia el distribuidor que tiene forma de tobera donde se acelera el flujo e incide en el rotor con un ángulo comprendido entre 45 y 120 grados para que transmita la energía cinética a los álabes.



Rodete: Es una rueda hidráulica con un eje horizontal. Dicha rueda tiene diversos álabes dispuestos radialmente con una torsión que hace que el extremo tenga una cierta inclinación tangencial. Los bordes se afilan para reducir la resistencia al flujo. Cada álabe tiene una sección circular y tiene los extremos soldados a un disco. Como se ha comentado en el apartado de funcionamiento, los rodetes de las turbinas Crossflow se suelen construir como subrodetes de diferente capacidad que comparten un mismo eje. Las ruedas son de mismo diámetro, pero con diferentes longitudes para manejar distintos volúmenes a la misma presión. En la ilustración puede observarse que se trata de un rodete que maneja 4 caudales distintos.

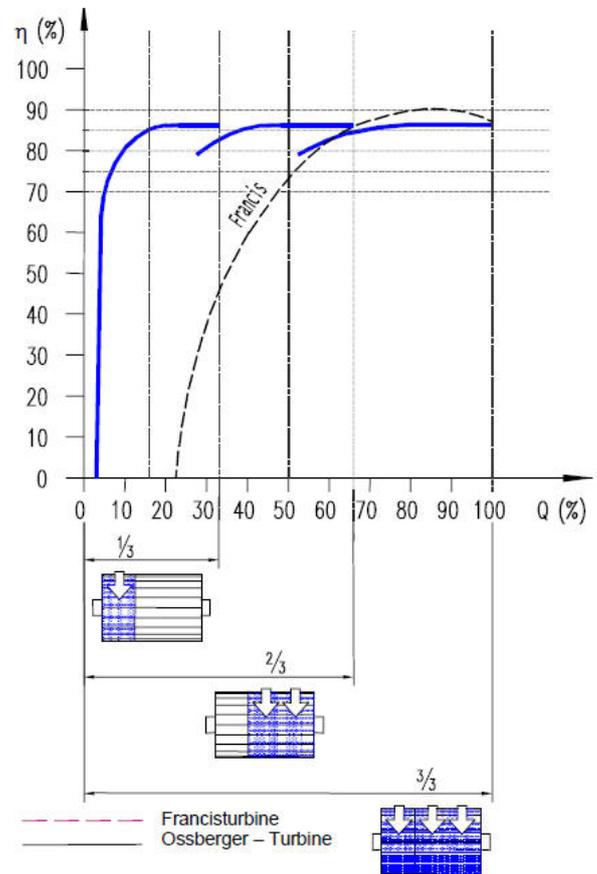


Ventajas y ámbito de aplicación

La primera gran ventaja de la turbina Crossflow es su elevada eficiencia para un amplio rango de caudales. Esto se debe al control del caudal mediante el rotor dividido y el ajuste del difusor. La otra gran ventaja de esta turbina es su bajo coste y el hecho de que se alcanza un nivel aceptable de rendimiento con turbinas pequeñas.

Estas dos ventajas hacen de esta turbina una máquina idónea para su utilización en ríos y canalizaciones fluviales de caudal variable e instalaciones de menos de 2000 kW y alturas de menos de 200m.

En la ilustración se ven los rendimientos que pueden obtenerse con una turbina Crossflow cuyo rotor esté dividido en tres partes, para diferentes caudales. Se observa cómo el rendimiento máximo es del orden del 85% y la curva es bastante plana gracias a la graduación continua del caudal dentro de la división 1/3-2/3-3/3. Con trazo discontinuo aparece representada la curva de una turbina Francis y se ve cómo, a pesar de tener un rendimiento máximo mayor; no tiene una curva tan plana y su rendimiento para caudales bajos es menor.



MONTAJE EXPERIMENTAL

El propósito de la práctica es únicamente didáctico y la turbina que va a ensayarse se diseñó a modo de trabajo fin de carrera con este fin. De modo que, como puede observarse en la Figura1, se trata de una turbina Crossflow con un rotor de longitud reducida (en el ámbito profesional no se construiría un rotor de longitud tan pequeña).



Figura1. Turbina Banki del laboratorio

En la figura 2 se puede ver el montaje experimental de la turbina del laboratorio. Con la bomba centrífuga y manejando cualquiera de las cinco válvulas que hay en las cuatro tuberías horizontales en paralelo, se simula aproximadamente una altura neta constante e igual a 17m en la turbina. Es posible que en algún caso para simular la altura sea necesario manejar además la válvula de la tubería que desemboca en la turbina.

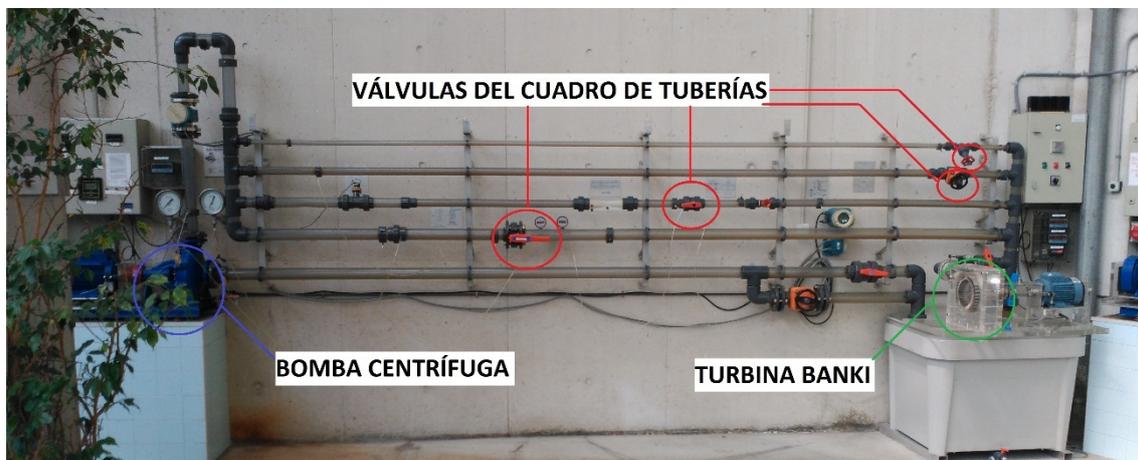


Figura2. Resumen del montaje experimental de la práctica con los componentes principales.

DESARROLLO ANALÍTICO

Altura neta de la turbina

Por definición, la altura neta de la turbina es toda la altura que ha entregado o cedido el agua incluyendo pérdidas y energía entregada al rodete. Siempre que se habla de altura en una turbina, se entiende que se refiere a altura neta, salvo que se especifique que se trate de altura de Euler o altura de pérdidas; que son otras alturas típicas de las turbinas. De modo que dicha altura neta se denotará con la letra H.

Dada su definición, se deduce que la altura neta se obtiene de la diferencia de alturas totales (altura geométrica, altura de velocidad y altura de presión) del fluido a la entrada y a la salida de la turbina:

$$H = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + Z \right)_{Entrada} - \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + Z \right)_{Salida} \quad (1)$$

Como entrada a la turbina se tomará la del inyector y como salida se considera el eje de rotación de la turbina. Siendo la distancia entre estos dos puntos de 120 mm como se puede apreciar en la Figura 3.

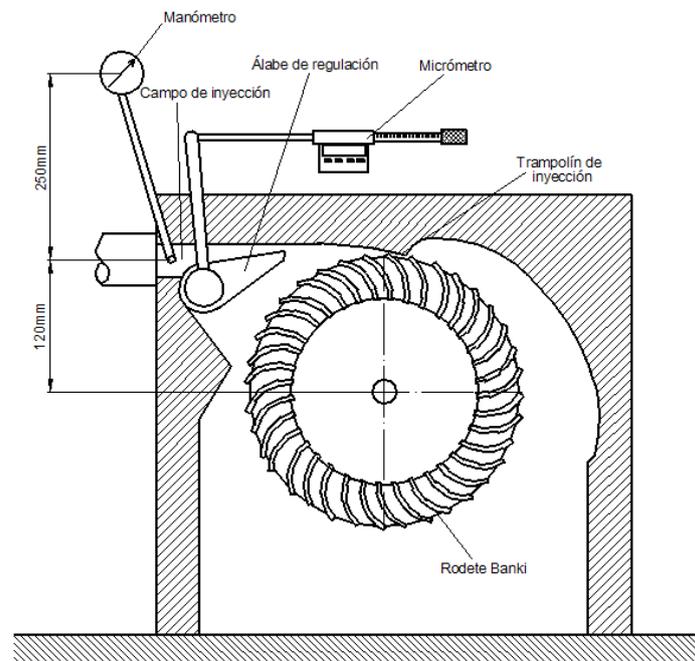


Figura 3. Detalle de la turbina Banki y de cotas importantes



La turbina Banki es de acción, por lo que la presión (relativa) del agua a la salida es cero, lo mismo que a la entrada del rodete, que es un chorro libre. La “z” a la salida es cero, pues se toma como origen.

La presión a la entrada de la turbina se mide con un manómetro digital colocado 250 mm por encima de la entrada.

Expresión de la altura neta:

$$H = \frac{P_E}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g} + Z_E = \frac{P_{\text{Manómetro}}}{\rho g} + 0,25 + \frac{v_E^2}{2g} + 0,12 \quad (2)$$

Si la presión del manómetro viniera expresada en kg/cm² y el caudal en m³/h, tendríamos la siguiente expresión:

$$H = 10P_{\text{Man}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) + 0,25 + 1,092 \times 10^{-2} (Q(\text{m}^3/\text{h}))^2 \quad (3)$$

Como la presión en el manómetro digital aparece en bar, y teniendo en cuenta la relación 1bar = 1,019 kg/cm²; se obtiene:

$$H = 10,2P_{\text{Man}}(\text{bar}) + 0,25 + 1,092 \times 10^{-2} (Q(\text{m}^3/\text{h}))^2 \quad (3')$$

En la Banki se tienen caudales importantes, que influyen significativamente en la presión a la hora de mantener la altura constante; por lo que no se puede considerar la presión constante a lo largo del experimento, sino que a cada valor de caudal le corresponde un valor de presión. Cuando se realicen medidas, para una posición fija del inyector, la presión indicada por el manómetro oscilará, cambiará aleatoriamente, lo que obligaría a estar continuamente jugando con las válvulas. Para evitar esto se tomará nota de la presión del manómetro en cada medida, anotando esos pequeños cambios caóticos. Posteriormente se transformarán las medidas obtenidas, mediante las relaciones de semejanza, a las que se habrían obtenido si realmente la altura neta hubiera sido, rigurosamente, **17 m**.

Potencia Neta

Es la que el agua entrega a la turbina, la que pierde el flujo. Es la potencia que tiene el agua a la entrada de la turbina menos la que tiene a la salida (que se ha aproximado a cero). Analíticamente queda expresada:

$$P_{\text{Neta}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (4)$$

Potencia útil

Es la potencia mecánica que entrega la turbina en su eje (P_{eje}). Se obtiene por tanto como el producto de la velocidad angular con que gira dicho eje por el par al que está sometido. La velocidad angular se mide mediante un sensor inductivo que detecta el paso de los dientes de una pequeña corona dentada que tiene el eje. Mientras que la medida del momento torsor se obtiene mediante dos aparatos distintos, con una célula de carga, o bien mediante un transductor de par.

La célula de carga es un aparato que mide el par de la siguiente forma. Se coloca coaxial a la turbina un generador eléctrico que absorbe todo el par del eje. Y el generador eléctrico se coloca a su vez anclado a un columpio que también es coaxial con el eje de la turbina. El par exterior que se ha de hacer sobre el columpio para que no gire (En la Figura 4 correspondería con el producto de $L \times F$) es igual al momento torsor que entrega la turbina y absorbe el generador. De modo que lo que hace la célula de carga es medir la fuerza (F en la Ilustración x) que compensa el par de fuerzas de la turbina, lo multiplica por el valor fijado L y proporciona el valor del momento torsor.

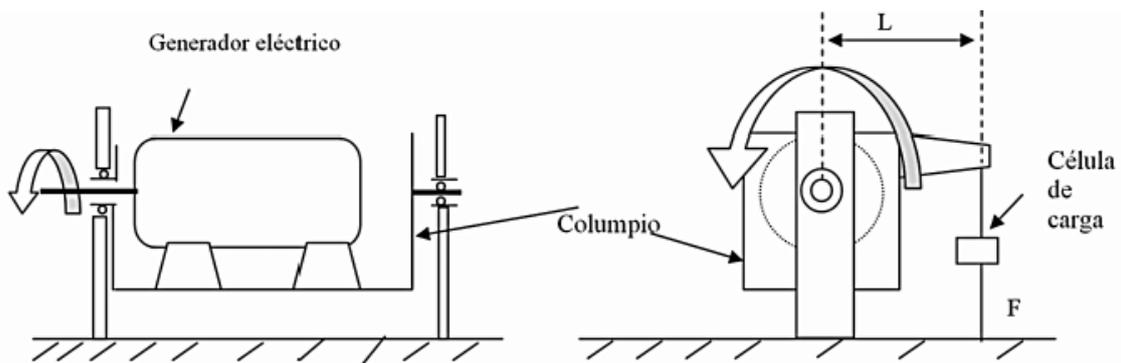


Figura 4. Esquema ilustrativo del funcionamiento de la célula de carga con que se mide el par del eje de la turbina

La explicación del transductor de par es más sencilla ya que mide el par torsor mediante galgas extensiométricas. Estas tres medidas aparecen en los displays que se encuentran bajo el panel eléctrico del variador de frecuencia.

De este modo, la potencia útil nos queda:

$$P_{\text{Útil}} = P_{Eje} = M \cdot \omega \quad (5)$$





Rendimiento total

El rendimiento total viene definido como:

$$\eta_{Total} = \frac{P_{Eje}}{P_{Neta}} \quad (6)$$

Considerando que el rodete está bien diseñado y que todo el caudal impacta con los álabes del rodete obtendríamos que el rendimiento volumétrico es la unidad ($\eta_{Volumétrico}=1$). Y, por tanto, quedaría:

$$\eta_{Total} = \eta_{Rodete} \cdot \eta_{Inyector}$$

Coefficientes de velocidad

Los coeficientes de velocidad se definen como el cociente entre la velocidad considerada en cada caso, dividida entre $(2gH)^{1/2}$, siendo H la altura neta.

De este modo, K_{U1} se define en la situación de máximo rendimiento, refiriéndose a cada posición del inyector:

$$K_{U1} = \left. \frac{U1}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \right]_{\text{Con } \mu_{\text{máx para cada "x"}}$$

Siendo $U1$ la velocidad del álabe referida al diámetro nominal:

$$U1 = \omega \cdot R_{Rodete}$$

El radio del rodete es 120mm.

Se define $K_{U1(\text{embalamiento})}$ como:

$$K_{U1(\text{embalamiento})} = \frac{U_{\text{embalamiento}}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}}$$



PARÁMETROS QUE HAN DE MEDIRSE

Se hará un conjunto de medidas para varias aperturas del inyector (5 - 10 - 15 - 20 - 22,5 - 25 - 27,5 y 30mm). Para cada apertura del inyector habrá un caudal y una presión determinados para que la altura simulada sea aproximadamente constante e igual a 17m. Como se ha comentado anteriormente, a cada valor de caudal le corresponde un valor de presión, para mantener la altura a 17m. Conseguir los valores exactos puede resultar costoso ya que hay que jugar con el micrómetro del inyector y las válvulas de las tuberías; y hay que prestar atención a la presión que marcan los manómetros y al caudal. Para ahorrar tiempo, seguidamente se sugiere un procedimiento iterativo que facilitaría alcanzar el punto exacto de presión y caudal que proporcionan la altura de 17m.

El procedimiento se ejecutaría para cada una de las aperturas del micrómetro y se implementaría de la siguiente forma (Por ejemplo, supongamos que se quiere tomar las medidas con el micrómetro a 15mm):

- En primer lugar, como es lógico, se coloca el micrómetro a 15mm provocando así la correspondiente apertura del inyector.
- En esta posición y con las válvulas del sistema abiertas o cerradas de forma aleatoria, se toma la medida de caudal que marca el caudalímetro y se introduce en la siguiente fórmula:
- $$\frac{17-0,25-0,12-1,092 \cdot 10^{-2} \cdot Q^2}{10,2} = P_{man\ teórica}(bar) \quad (3^*)$$
. Esta fórmula es una transformación de la ecuación (3') que proporciona la presión manométrica que se debería conseguir para que teniendo un caudal Q se obtuviera una altura de 17m.
- Seguidamente, se modifica la apertura de las válvulas del circuito para así obtener una presión igual a la obtenida mediante la ecuación (3*). Probablemente esa modificación de la presión conduzca también a una modificación del caudal, de modo que se reintroduce ese nuevo caudal en la fórmula y se procede de igual modo hasta ajustar el valor.
- Con dos iteraciones generalmente es suficiente para llegar al punto deseado.

El objetivo de esta práctica es acercarse al punto de máximo rendimiento que está situado en torno a las 700rpm de manera precisa. No resulta de interés para esta práctica medir valores de velocidad por encima de las 900rpm.



Para cada abertura del inyector (x) se variará la velocidad de la turbina desde aproximadamente 250rpm hasta 900rpm tomando valores cada 50rpm, de modo que se obtengan 14 puntos más el punto de embalamiento (punto de par cero). Se procurará experimentar, con las velocidades propuestas como orientativas, aunque en los cálculos se tendrán en cuenta las que realmente se hayan medido. Se hará imponiendo diversas frecuencias a la corriente eléctrica producida por el generador, mediante un variador de frecuencia. Se ha elegido el intervalo comprendido entre 250 rpm y 900 rpm porque entre ellas está el punto de operación de máximo rendimiento de la turbina, e interesa medirlo con precisión. Seguidamente aparece la tabla que habrá que rellenar.

X (mm)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	Q(m ³ /h)	P(bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
	≈250					
	≈300					
	≈350					
	≈400					
	≈450					
	≈500					
	≈550					
	≈600					
	≈650					
	≈700					
	≈750					
	≈800					
	≈850					
	≈900					
	Embalamiento					

Siendo:

- X: Apertura del micrómetro.
- n_o : Velocidad angular orientativa que se buscaría ajustar con el variador de frecuencia.
- n_m : Velocidad angular medida, que podría no ser igual a la orientativa (ya que es difícil ajustar exactamente esas velocidades con el variador de frecuencia).
- Q: Caudal turbinado.
- P: Presión manométrica.
- M: Par torsor, bien de la célula de carga, o bien del transductor de par (podrían no coincidir, aunque lo ideal sería que lo hicieran).



Mientras no se cambie la apertura del inyector (x) ni se modifiquen las válvulas del circuito, el caudal (Q) y la presión indicada por el manómetro tendrían que ser constantes en el tiempo, pero en realidad no es así. Por el comportamiento del motor-bomba que simula el salto de agua y por la falta de estabilidad de la red eléctrica estos valores fluctúan. Se Tomará nota de esas fluctuaciones, aunque sean pequeñas.

Estos pequeños cambios harán que cambie la altura neta, que será ligeramente distinta en cada punto de operación medido.

Como se trata de simular un salto de agua de altura constante, mediante las **relaciones de semejanza se** calcularán los puntos homólogos a los medidos que tengan, todos ellos, **una altura neta constante: $H=17m$** .

A los valores homólogos a los obtenidos experimentalmente y correspondientes a **$H=17m$** se les llamará “**datos experimentales corregidos**”. Son los valores experimentales que se habrían obtenido para Q , n y P si la altura neta real hubiese sido constantemente: **$H=17m$** .

Los datos obtenidos experimentalmente para cada una de las posiciones del inyector, vienen recogidos en las siguientes tablas:

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m^3/h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
5					



X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
10					

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
15					



X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
20					

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
22,5					



X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
25					

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
27,5					



X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
30					



CONSTRUCCIÓN DE LAS TABLAS

Para cada x se construirá una tabla. A continuación, se muestra un ejemplo de construcción de una de ellas columna a columna.

Las cinco primeras columnas son los valores directamente medidos. El par que se incluye en la tabla es el que proporciona el transductor de par y no el de la célula de carga. Esta decisión se debe a dos motivos. El primero es que la célula de carga puede acumular varios errores de medida debidos causas aparentemente sin importancia pero que tienen gran repercusión, como la forma en que cuelga el cable del generador eléctrico. Y el segundo motivo es que, debido a la configuración de la célula de carga, ésta no puede medir pares de más de 12,59 Nxm.

En definitiva, las cinco primeras medidas se obtienen directamente del micrómetro y de los valores indicados en los displays.

A partir de aquí se explica la obtención de las columnas restantes.

6ª Columna:

Se calcula la altura neta (H) mediante la expresión (3').

7ª Columna:

De los valores medidos se obtienen diversas alturas netas " H ". Debido a las fluctuaciones en las medidas, en vez de obtener una sola " H " se obtienen diversas, aunque muy parecidas. Pues bien, hay que corregir estas medidas a las que se habrían obtenido si la altura neta hubiera sido rigurosamente constante e igual a $H=17\text{m}$.

A los valores de " n_c ", " Q_c ", y " M_c " así obtenidos se les llamará "experimentales corregidos", puntos homólogos.

Cálculo de la velocidad de rotación corregida: $n_c(\text{homóloga})$ es la velocidad de la turbina que corresponde al punto homólogo al medido, pero con: $H_{\text{homóloga}} = 17\text{m}$.

$$\frac{H_{\text{homóloga}}}{H} = \left(\frac{n_{\text{homóloga}}}{n} \right)^2 \Rightarrow \text{obtenemos } n_{\text{homóloga}}$$

8ª Columna:

El caudal del punto homólogo al medido y que corresponde a $H_{\text{homóloga}} = 17\text{m}$ se obtiene:

$$\frac{Q_{\text{homólogo}}}{Q} = \frac{n_{\text{homóloga}}}{n} \Rightarrow \text{obtenemos } Q_{\text{homólogo}}$$

9ª Columna:

El par del punto homólogo:

$$\frac{Pot_{\text{homóloga}}}{Pot} = \left(\frac{n_{\text{homóloga}}}{n}\right)^3 = \frac{M_{\text{homólogo}}}{M} \cdot \frac{n_{\text{homóloga}}}{n} \Rightarrow \frac{M_{\text{homólogo}}}{M} = \left(\frac{n_{\text{homóloga}}}{n}\right)^2$$

$$\Rightarrow \text{obtenemos } M_{\text{homólogo}}$$

Ya se tienen los valores “experimentales corregidos” n_c , Q_c , M_c , todos ellos correspondientes a la altura neta $H_{\text{homóloga}} = 17\text{m}$.

A partir de ahora todos los cálculos se harán sobre estos valores, columnas 7, 8 y 9.

10ª Columna:

Potencia útil de la turbina o potencia en el eje, de la ecuación (5).

11ª Columna:

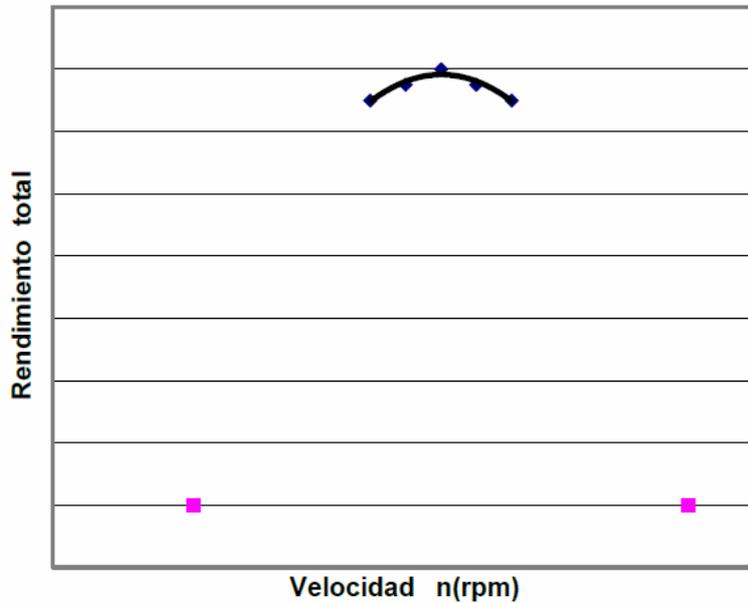
Potencia neta, de la ecuación (4) calculada con el caudal medio de la columna “8”, y la altura neta: $H = 17\text{m}$.

12ª Columna:

Rendimiento total de la turbina, de la ecuación (6).

13ª Columna:

Velocidad óptima de la turbina, la que corresponde al rendimiento total máximo de la turbina. Las revoluciones al minuto a que debe girar la turbina para que sea máximo su rendimiento se obtendrá a posteriori. Lo normal es que no coincida con ninguno de los puntos experimentales corregidos. Saldrá interpolando en la gráfica:



Los puntos a tener en cuenta para la interpolación no han de ser todos, únicamente nos interesan los cercanos al máximo rendimiento y si hay algún valor díscolo que se sale de la pauta de los demás lo hemos de achacar a un error de medida y lo lógico es no contar con él.

14ª Columna:

Coeficiente de velocidad de arrastre K_{U1} , calculado en la situación de máximo rendimiento, con la velocidad de rotación deducida en la columna anterior.

$$K_{U1} = \left(\frac{U1}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \right)_{\mu \text{ (máximo)}} = \frac{\omega_{\mu \text{ (máximo)}} \cdot R}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}}$$

El radio del rodete es: R=120mm y H=17m.



15ª Columna:

Coeficiente de velocidad de embalamiento” Kuembalamiento:

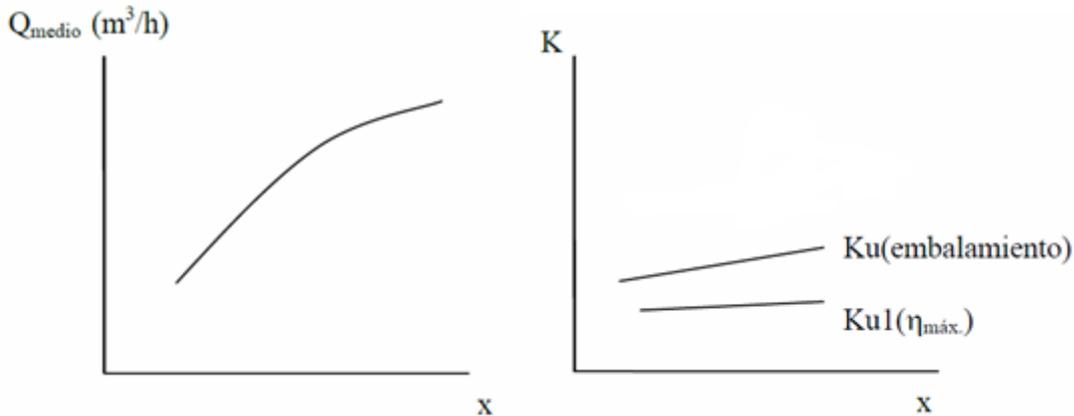
$$K_{U\text{ embalamiento}} = \frac{\omega_{\text{embalamiento}} \cdot R}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}}$$

El punto de embalamiento es uno de los medidos y corregido para H=17m.

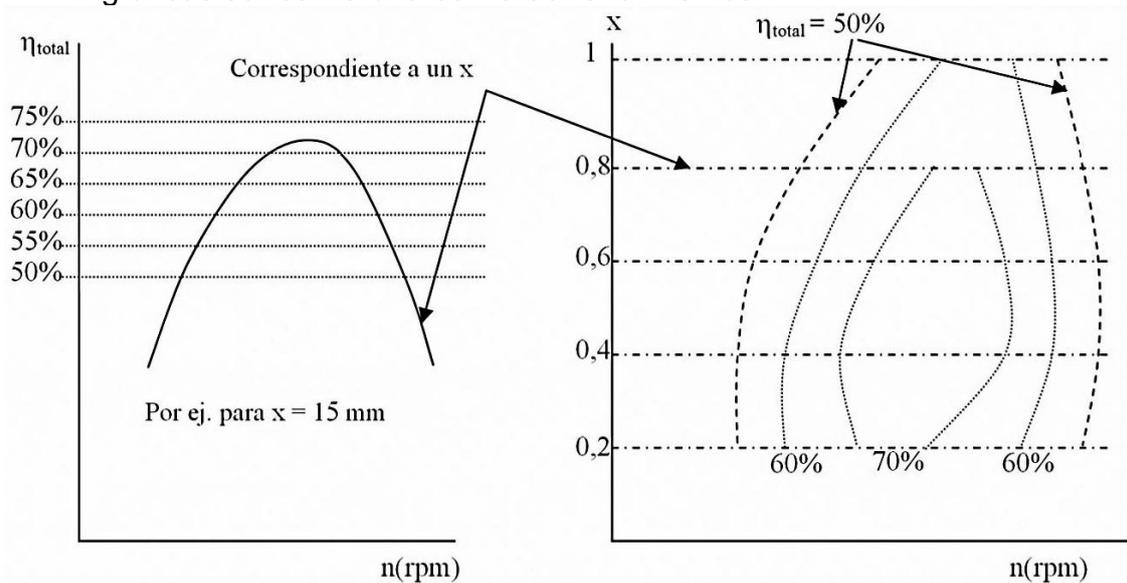
Gáficas que hay que realizar

Se realizarán las siguientes gráficas:

- Caudal (Q) en función de la apertura del micrómetro (x).



- Gráficas η_{total}-n, para cada apertura del micrómetro (x). Con estas gráficas se realizará la colina de rendimientos.



Los datos para construir la colina de rendimientos se tomarán del gráfico η_{total} - n (rpm). Cada valor η_{total} (0,30-0,35-0,40-0,45...) cortará las curvas de apertura del micrómetro x (10mm, 15mm, 20mm, 22,5mm...) o a las curvas de caudal, para cierto valor de n (rpm). Se toman las intersecciones y se representan en el diagrama x - n o Q - n de la colina de rendimientos. Finalmente se unen los puntos de igual rendimiento en dicho diagrama.

De la colina de rendimientos se intentará apreciar dónde está el rendimiento máximo. Para qué "caudal" (x ó Q) y para qué (n). Sería como las coordenadas de la cima de la montaña. Ese punto de máximo rendimiento se tomará como el punto de diseño de la turbina.

Con las características del punto de diseño se calcula la "velocidad específica" en función de la potencia (n_s ; nº de Kammerer), y la velocidad específica adimensional (ω_s).

$$n_s = \frac{n(\text{rpm}) \cdot \sqrt{P_{eje}(\text{CV ó KW})}}{H_{neta}^{5/4}} \Bigg|_{\text{Punto de diseño } ,\mu_{\text{máx}}}$$

Hay que especificar si la potencia se ha expresado en CV ó en KW.

$$\omega_s = \frac{\omega\left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) \cdot \sqrt{\frac{P_{eje}}{\rho}}}{(g \cdot H_{neta})^{5/4}} \Bigg|_{\text{Punto de diseño } ,\mu_{\text{máx}}}$$



Trabajo a realizar:

- Completar las tablas de valores medidos y calculados.
- Realizar las gráficas correspondientes.
- Cálculo del punto de diseño, del número específico de revoluciones y de la velocidad específica adimensional.
- Discusión de los resultados obtenidos.

Punto de diseño:

n: _____rpm

x: _____mm

Hneta: 17m

$\eta_{\text{máx}}$: _____%

Peje: _____W

TABLAS DE RESULTADOS MEDIDOS EN EL LABORATORIO

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
5	250	9,36	1,53	3,86	3,84
	302	9,36	1,53	3,67	3,61
	351	9,36	1,53	3,53	3,46
	401	9,36	1,53	3,46	3,41
	451	9,36	1,53	3,42	3,40
	501	9,36	1,53	3,26	3,26
	551	9,36	1,53	3,02	3,00
	602	9,36	1,53	2,69	2,69
	651	9,36	1,53	2,32	2,32
	699	9,36	1,53	1,98	1,98
	749	9,36	1,53	1,66	1,66
	799	9,36	1,53	1,38	1,38
	852	9,36	1,53	1,11	1,11
	902	9,36	1,53	0,87	0,87
	Embalamiento 1115	9,36	1,53	0,00	-0,01

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
10	251	13,43	1,44	6,98	6,95
	303	13,33	1,44	6,73	6,69
	350	13,33	1,44	6,53	6,47
	400	13,33	1,44	6,35	6,28
	452	13,33	1,44	6,08	6,04
	500	13,33	1,44	5,80	5,78
	551	13,33	1,44	5,40	5,38
	602	13,33	1,44	4,97	4,95
	649	13,33	1,44	4,56	4,56
	701	13,33	1,44	4,11	4,11
	751	13,33	1,44	3,60	3,60
	802	13,33	1,44	3,15	3,15
	849	13,33	1,44	2,55	2,55
	901	13,33	1,44	2,09	2,09
	Embalamiento 1223	13,33	1,44	-0,01	-0,02

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
15	252	17,57	1,30	10,00	9,97
	300	17,57	1,30	9,65	9,60
	349	17,57	1,30	9,25	9,20
	402	17,57	1,30	8,81	8,74
	450	17,57	1,30	8,43	8,37
	501	17,57	1,30	8,05	8,01
	551	17,57	1,30	7,70	7,66
	601	17,57	1,30	7,22	7,18
	652	17,57	1,30	6,72	6,72
	699	17,57	1,30	6,21	6,21
	749	17,57	1,30	5,65	5,65
	800	17,57	1,30	4,95	4,95
	851	17,57	1,30	4,11	4,11
	902	17,57	1,30	3,47	3,47
	Embalamiento 1247	17,57	1,30	0,02	-0,01

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
20	249	21,63	1,13	12,59	12,48
	301	21,60	1,13	12,15	12,07
	350	21,60	1,13	11,68	11,60
	400	21,60	1,13	11,20	11,12
	451	21,60	1,13	10,69	10,62
	501	21,60	1,13	10,17	10,14
	551	21,60	1,13	9,63	9,58
	601	21,60	1,13	9,13	9,07
	651	21,60	1,13	8,53	8,53
	701	21,60	1,13	7,98	7,98
	748	21,60	1,13	7,37	7,37
	802	21,60	1,13	6,54	6,54
	851	21,60	1,13	5,68	5,68
	899	21,60	1,13	4,70	4,70
	Embalamiento 1244	21,60	1,13	-0,01	-0,04

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
22,5	252	23,57	1,03	13,66	12,59
	301	23,57	1,03	13,17	12,59
	352	23,57	1,03	12,67	12,44
	402	23,57	1,03	12,16	12,09
	449	23,57	1,03	11,64	11,54
	499	23,57	1,03	11,05	11,62
	550	23,57	1,03	10,43	10,39
	603	23,57	1,03	9,80	9,76
	650	23,57	1,03	9,25	9,25
	701	23,57	1,03	8,60	8,60
	751	23,57	1,03	7,81	7,81
	802	23,57	1,03	7,24	7,24
	851	23,57	1,03	6,49	6,49
	902	23,57	1,03	5,65	5,65
	Embalamiento 1248	23,57	1,03	-0,01	-0,01

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
25	251	25,60	0,92	14,82	12,59
	301	25,57	0,92	14,27	12,59
	351	25,57	0,92	13,76	12,59
	400	25,57	0,92	13,20	12,59
	452	25,57	0,92	12,56	12,49
	499	25,57	0,92	11,99	11,93
	551	25,57	0,92	11,30	11,26
	602	25,57	0,92	10,59	10,55
	649	25,57	0,92	9,89	9,89
	699	25,57	0,92	9,29	9,29
	752	25,57	0,92	8,44	8,44
	800	25,57	0,92	7,77	7,77
	851	25,57	0,92	6,88	6,88
	901	25,57	0,92	5,75	5,75
	Embalamiento 1254	25,57	0,92	0,02	-0,01

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
27,5	251	27,67	0,81	15,98	12,59
	300	27,67	0,81	15,35	12,59
	349	27,67	0,81	14,82	12,59
	401	27,67	0,81	14,18	12,59
	451	27,67	0,81	13,51	12,59
	503	27,70	0,81	12,82	12,59
	550	27,67	0,81	12,15	12,11
	602	27,67	0,81	11,33	11,28
	651	27,67	0,81	10,54	10,54
	701	27,67	0,81	9,87	9,87
	748	27,67	0,81	9,07	9,07
	802	27,67	0,81	8,18	8,18
	851	27,67	0,81	7,16	7,16
	899	27,67	0,81	6,13	6,13
	Embalamiento 1260	27,83	0,81	-0,03	-0,03

X (mm)	n_m (rpm)	Q (m ³ /h)	P (bar)	M(Nxm) Célula carga	M(Nxm) Transductor
30	252	29,57	0,69	16,91	12,59
	302	29,57	0,69	16,25	12,59
	348	29,57	0,69	15,68	12,59
	402	29,57	0,69	14,97	12,59
	450	29,57	0,69	14,26	12,59
	501	29,57	0,69	13,57	12,59
	549	29,57	0,69	12,82	12,59
	599	29,57	0,69	11,94	11,85
	652	29,57	0,69	11,07	11,07
	699	29,57	0,69	10,12	10,12
	749	29,57	0,69	8,95	8,95
	800	29,57	0,69	7,59	7,59
	851	29,57	0,69	6,35	6,35
	902	29,57	0,69	5,30	5,30
	Embalamiento 1260	29,57	0,69	-0,01	-0,01

A continuación, para cada "x", se rellenan las tablas correspondientes.



Valores medidos, experimentales					Experimentales corregidos Puntos homólogos a H=17m					Pot _{eje} (W)	Pot _{neto} (W)	η _{total} (%)	n(η _{máx}) (rpm)	Ku1 (η _{max}) 14	Ku(embalamiento) 15
X 1	n _m (rpm) 2	Q (m3/h) 3	P (bar) 4	M (nxm) 5	H (m) 6	n _c (rpm) 7	Q _c (m3/h) 8	M _c (nxm) 9							

Leyenda:

- X: Apertura del micrómetro.
- n_m: Velocidad angular medida
- Q: Caudal turbinado.
- P: Presión manométrica.
- M: Par torsor medido por el transductor de par. Se emplea en vez de la célula de carga porque proporciona valores de par más allá de los 12,59 Nxm.
- H: Altura obtenida de los valores medidos (se recuerda que no será exactamente 17m).
- Q_c, n_c, M_c: Son el caudal, la velocidad, y el par corregidos a 17m.
- n(η_{máx}): Velocidad para la cual se obtiene el máximo rendimiento.
- Ku1 (η_{máx}), Ku (embalamiento): Coeficientes de velocidad para la velocidad de máximo rendimiento y para la de embalamiento.



Valores medidos, experimentales					Experimentales corregidos Puntos homólogos a H=17m					Pot _{eje} (W)	Pot _{neto} (W)	η _{total} (%)	η(η _{máx}) (rpm)	Ku1 (η _{max}) 14	Ku(embalamiento) 15
x 1	n _m (rpm) 2	Q (m ³ /h) 3	P (bar) 4	M (nxm) 5	H (m) 6	n _c (rpm) 7	Q _c (m ³ /h) 8	M _c (nxm) 9							
5	250	9,36	1,53	3,86	16,97	250,2	9,37	3,86	101,26	434,03	23,33	551,2	0,38	0,77	
	302	9,36	1,53	3,67	16,97	302,0	9,37	3,68	116,38		26,81				
	351	9,36	1,53	3,53	16,97	351,7	9,37	3,54	130,26		30,01				
	401	9,36	1,53	3,46	16,97	401,4	9,37	3,47	145,72		33,57				
	451	9,36	1,53	3,42	16,97	451,4	9,37	3,43	162,16		37,36				
	501	9,36	1,53	3,26	16,97	501,2	9,37	3,27	171,60		39,54				
	551	9,36	1,53	3,02	16,97	551,2	9,37	3,03	174,66		40,24				
	602	9,36	1,53	2,69	16,97	602,6	9,37	2,69	169,87		39,14				
	651	9,36	1,53	2,32	16,97	651,6	9,37	2,32	158,51		36,52				
	699	9,36	1,53	1,98	16,97	699,6	9,37	1,98	145,01		33,41				
	749	9,36	1,53	1,66	16,97	749,7	9,37	1,67	130,73		30,12				
	799	9,36	1,53	1,38	16,97	799,7	9,37	1,38	115,58		26,63				
	852	9,36	1,53	1,11	16,97	852,8	9,37	1,11	99,52		22,93				
	902	9,36	1,53	0,87	16,97	902,8	9,37	0,87	82,60		19,03				
1115	9,36	1,53	0,00	16,97	1115,8	9,37	0,00	0,39	0,09						



Valores medidos, experimentales					Experimentales corregidos Puntos homólogos a H=17m					Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	η(η _{máx}) (rpm)	Ku1 (η _{max}) 14	Ku(embalamiento) 15
x 1	n _m (rpm) 2	Q (m ³ /h) 3	P (bar) 4	M (nxm) 5	H (m) 6	n _c (rpm) 7	Q _c (m ³ /h) 8	M _c (nxm) 9							
10	251	13,43	1,44	6,98	17,03	251,1	13,42	6,97	183,25	617,68	29,47	602	0,41	0,84	
	303	13,33	1,44	6,73	17,00	303,0	13,33	6,73	213,56		34,57				
	350	13,33	1,44	6,53	17,00	350,3	13,33	6,53	239,58		38,79				
	400	13,33	1,44	6,35	17,00	399,7	13,33	6,35	265,64		43,01				
	452	13,33	1,44	6,08	17,00	452,0	13,33	6,08	287,96		46,62				
	500	13,33	1,44	5,80	17,00	499,7	13,33	5,80	303,50		49,14				
	551	13,33	1,44	5,40	17,00	550,7	13,33	5,40	311,61		50,45				
	602	13,33	1,44	4,97	17,00	602,0	13,33	4,97	313,33		50,73				
	649	13,33	1,44	4,56	17,00	649,0	13,33	4,56	310,01		50,19				
	701	13,33	1,44	4,11	17,00	701,0	13,33	4,11	301,86		48,87				
	751	13,33	1,44	3,60	17,00	751,0	13,33	3,60	283,14		45,84				
	802	13,33	1,44	3,15	17,00	802,0	13,33	3,15	264,55		42,83				
	849	13,33	1,44	2,55	17,00	849,0	13,33	2,55	227,00		36,75				
	901	13,33	1,44	2,09	17,00	901,0	13,33	2,09	197,60		31,99				
1223	13,33	1,44	-0,01	17,00	1223,0	13,33	-0,01	-0,85	0,00						



Valores medidos, experimentales					Experimentales corregidos Puntos homólogos a H=17m					Pot _{eje} (W)	Pot _{neto} (W)	η _{total} (%)	η(η _{máx}) (rpm)	Ku1 (η _{max}) 14	Ku(embalamiento) 15
x 1	n _m (rpm) 2	Q (m ³ /h) 3	P (bar) 4	M (nxm) 5	H (m) 6	n _c (rpm) 7	Q _c (m ³ /h) 8	M _c (nxm) 9							
15	252	17,57	1,30	10,00	17,00	251,7	17,57	10,00	263,46	813,78	32,38	652	0,45	0,86	
	300	17,57	1,30	9,65	17,00	300,3	17,57	9,65	303,40		37,28				
	349	17,57	1,30	9,25	17,00	348,7	17,57	9,25	337,75		41,50				
	402	17,57	1,30	8,81	17,00	401,7	17,57	8,81	370,72		45,55				
	450	17,57	1,30	8,43	17,00	449,7	17,57	8,43	396,97		48,78				
	501	17,57	1,30	8,05	17,00	501,3	17,57	8,05	422,63		51,93				
	551	17,57	1,30	7,70	17,00	551,3	17,57	7,70	444,38		54,61				
	601	17,57	1,30	7,22	17,00	601,0	17,57	7,22	454,41		55,84				
	652	17,57	1,30	6,72	17,00	652,0	17,57	6,72	458,81		56,38				
	699	17,57	1,30	6,21	17,00	699,0	17,57	6,21	454,66		55,87				
	749	17,57	1,30	5,65	17,00	749,0	17,57	5,65	442,86		54,42				
	800	17,57	1,30	4,95	17,00	800,0	17,57	4,95	414,54		50,94				
	851	17,57	1,30	4,11	17,00	851,0	17,57	4,11	366,45		45,03				
	902	17,57	1,30	3,47	17,00	902,0	17,57	3,47	327,63		40,26				
1247	17,57	1,30	0,02	17,00	1247,0	17,57	0,02	2,18	0,27						



Valores medidos, experimentales					Experimentales corregidos Puntos homólogos a H=17m					Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	η(η _{máx}) (rpm)	Ku1 (η _{max}) 14	Ku(embalamiento) 15
x 1	n _m (rpm) 2	Q (m ³ /h) 3	P (bar) 4	M (nxm) 5	H (m) 6	n _c (rpm) 7	Q _c (m ³ /h) 8	M _c (nxm) 9							
20	249	21,63	1,13	12,59	16,97	248,9	21,65	12,61	328,64	1001,89	701,9	0,48	0,86	32,77	
	301	21,60	1,13	12,15	16,96	301,4	21,63	12,18	384,44					38,37	
	350	21,60	1,13	11,68	16,96	350,8	21,63	11,71	430,02					42,92	
	400	21,60	1,13	11,20	16,96	400,5	21,63	11,23	470,80					46,99	
	451	21,60	1,13	10,69	16,96	451,6	21,63	10,72	506,80					50,58	
	501	21,60	1,13	10,17	16,96	502,0	21,63	10,19	535,78					53,48	
	551	21,60	1,13	9,63	16,96	551,4	21,63	9,66	557,64					55,66	
	601	21,60	1,13	9,13	16,96	602,1	21,63	9,15	576,92					57,58	
	651	21,60	1,13	8,53	16,96	651,8	21,63	8,55	583,40					58,23	
	701	21,60	1,13	7,98	16,96	701,9	21,63	8,00	587,81					58,67	
	748	21,60	1,13	7,37	16,96	749,0	21,63	7,39	579,79					57,87	
	802	21,60	1,13	6,54	16,96	803,0	21,63	6,56	551,64					55,06	
	851	21,60	1,13	5,68	16,96	852,1	21,63	5,69	508,06					50,71	
	899	21,60	1,13	4,70	16,96	900,1	21,63	4,71	444,44					44,36	
1244	21,60	1,13	-0,01	16,96	1245,9	21,63	-0,01	-1,31	0,00						



Valores medidos, experimentales					Experimentales corregidos Puntos homólogos a H=17m					Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	η(η _{máx}) (rpm)	Ku1 (η _{max}) 14	Ku(embalamiento) 15
x 1	n _m (rpm) 2	Q (m ³ /h) 3	P (bar) 4	M (nxm) 5	H (m) 6	n _c (rpm) 7	Q _c (m ³ /h) 8	M _c (nxm) 9							
22,5	252	23,57	1,03	13,66	16,97	251,9	23,58	13,68	360,80	1092,53	33,02	701,5	0,48	0,86	
	301	23,57	1,03	13,17	16,97	301,2	23,58	13,19	415,95		38,07				
	352	23,57	1,03	12,67	16,97	352,3	23,58	12,69	468,07		42,84				
	402	23,57	1,03	12,16	16,97	402,6	23,58	12,18	513,47		47,00				
	449	23,57	1,03	11,64	16,97	449,7	23,58	11,66	548,93		50,24				
	499	23,57	1,03	11,05	16,97	499,0	23,58	11,07	578,49		52,95				
	550	23,57	1,03	10,43	16,97	550,4	23,58	10,45	602,25		55,12				
	603	23,57	1,03	9,80	16,97	603,4	23,58	9,82	620,42		56,79				
	650	23,57	1,03	9,25	16,97	650,5	23,58	9,26	630,72		57,73				
	701	23,57	1,03	8,60	16,97	701,5	23,58	8,61	632,68		57,91				
	751	23,57	1,03	7,81	16,97	751,6	23,58	7,83	615,97		56,38				
	802	23,57	1,03	7,24	16,97	802,6	23,58	7,25	609,52		55,79				
	851	23,57	1,03	6,49	16,97	851,6	23,58	6,50	579,26		53,02				
	902	23,57	1,03	5,65	16,97	902,7	23,58	5,65	534,47		48,92				
1248	23,57	1,03	-0,01	16,97	1249,3	23,58	-0,01	-0,87	0,00						



Valores medidos, experimentales					Experimentales corregidos Puntos homólogos a H=17m					Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	η(η _{máx}) (rpm)	Ku1 (η _{max}) 14	Ku(embalamiento) 15
x 1	n _m (rpm) 2	Q (m ³ /h) 3	P (bar) 4	M (nxm) 5	H (m) 6	n _c (rpm) 7	Q _c (m ³ /h) 8	M _c (nxm) 9							
25	251	25,60	0,92	14,82	16,91	251,3	25,67	14,90	392,02	1188,16	701,2	0,48	0,87	32,97	
	301	25,57	0,92	14,27	16,89	302,3	25,65	14,36	454,73					38,27	
	351	25,57	0,92	13,76	16,89	351,8	25,65	13,84	510,03					42,93	
	400	25,57	0,92	13,20	16,89	400,9	25,65	13,29	557,91					46,96	
	452	25,57	0,92	12,56	16,89	453,8	25,65	12,64	600,51					50,54	
	499	25,57	0,92	11,99	16,89	500,3	25,65	12,07	632,32					53,22	
	551	25,57	0,92	11,30	16,89	552,4	25,65	11,37	657,89					55,37	
	602	25,57	0,92	10,59	16,89	603,9	25,65	10,65	673,81					56,71	
	649	25,57	0,92	9,89	16,89	651,1	25,65	9,95	678,32					57,09	
	699	25,57	0,92	9,29	16,89	701,2	25,65	9,35	686,28					57,76	
	752	25,57	0,92	8,44	16,89	754,4	25,65	8,50	671,43					56,51	
	800	25,57	0,92	7,77	16,89	802,6	25,65	7,82	657,41					55,33	
	851	25,57	0,92	6,88	16,89	853,7	25,65	6,93	619,15					52,11	
	901	25,57	0,92	5,75	16,89	903,9	25,65	5,79	547,74					46,10	
1254	25,57	0,92	0,02	16,89	1258,0	25,65	0,02	2,65	0,22						



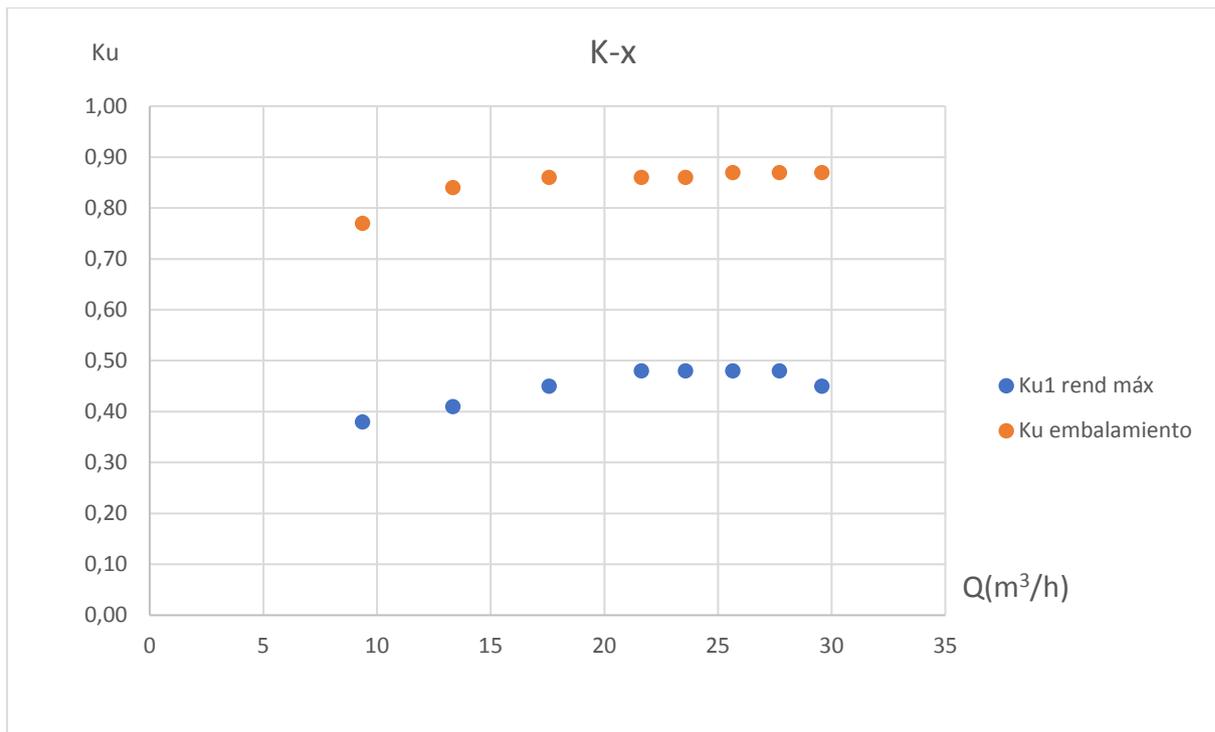
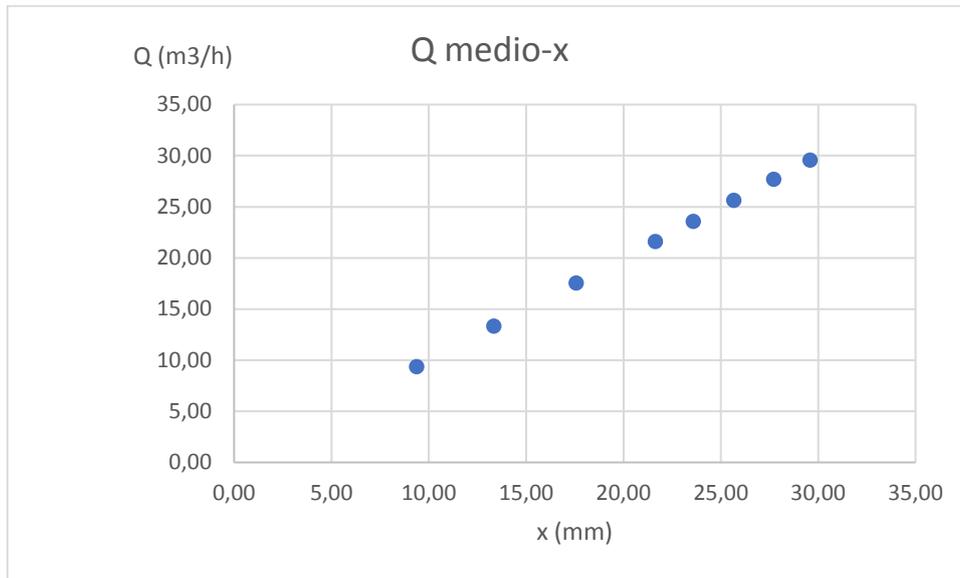
Valores medidos, experimentales					Experimentales corregidos Puntos homólogos a H=17m					Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	η(η _{máx}) (rpm)	Ku1 (η _{max}) 14	Ku(embalamiento) 15
x 1	n _m (rpm) 2	Q (m ³ /h) 3	P (bar) 4	M (nxm) 5	H (m) 6	n _c (rpm) 7	Q _c (m ³ /h) 8	M _c (nxm) 9							
27,5	251	27,67	0,81	15,98	16,96	251,0	27,70	16,02	421,08	1283,30	32,81	701,9	0,48	0,87	
	300	27,67	0,81	15,35	16,96	300,0	27,70	15,39	483,44		37,67				
	349	27,67	0,81	14,82	16,96	349,8	27,70	14,86	544,35		42,42				
	401	27,67	0,81	14,18	16,96	401,5	27,70	14,22	597,74		46,58				
	451	27,67	0,81	13,51	16,96	451,6	27,70	13,54	640,51		49,91				
	503	27,70	0,81	12,82	16,98	503,3	27,72	12,83	676,49		52,68				
	550	27,67	0,81	12,15	16,96	550,4	27,70	12,18	702,24		54,72				
	602	27,67	0,81	11,33	16,96	603,1	27,70	11,36	717,18		55,89				
	651	27,67	0,81	10,54	16,96	651,8	27,70	10,57	721,34		56,21				
	701	27,67	0,81	9,87	16,96	701,9	27,70	9,90	727,50		56,69				
	748	27,67	0,81	9,07	16,96	749,0	27,70	9,09	713,00		55,56				
	802	27,67	0,81	8,18	16,96	803,0	27,70	8,20	689,52		53,73				
	851	27,67	0,81	7,16	16,96	852,1	27,70	7,18	640,88		49,94				
	899	27,67	0,81	6,13	16,96	900,1	27,70	6,14	579,02		45,12				
1260	27,83	0,81	-0,03	17,06	1257,5	27,79	-0,03	-3,94	0,00						



Valores medidos, experimentales					Experimentales corregidos Puntos homólogos a H=17m					Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	η(η _{máx}) (rpm)	Ku1 (η _{max}) 14	Ku(embalamiento) 15
x 1	n _m (rpm) 2	Q (m ³ /h) 3	P (bar) 4	M (nxm) 5	H (m) 6	n _c (rpm) 7	Q _c (m ³ /h) 8	M _c (nxm) 9							
30	252	29,57	0,69	16,91	16,99	251,8	29,58	16,92	446,12	1370,15	32,56	652,2	0,45	0,87	
	302	29,57	0,69	16,25	16,99	302,1	29,58	16,26	514,56		37,55				
	348	29,57	0,69	15,68	16,99	348,5	29,58	15,69	572,56		41,79				
	402	29,57	0,69	14,97	16,99	402,1	29,58	14,98	630,86		46,04				
	450	29,57	0,69	14,26	16,99	450,2	29,58	14,27	672,69		49,10				
	501	29,57	0,69	13,57	16,99	501,2	29,58	13,58	712,69		52,02				
	549	29,57	0,69	12,82	16,99	548,9	29,58	12,83	737,55		53,83				
	599	29,57	0,69	11,94	16,99	599,2	29,58	11,95	749,75		54,72				
	652	29,57	0,69	11,07	16,99	652,2	29,58	11,08	756,46		55,21				
	699	29,57	0,69	10,12	16,99	699,2	29,58	10,12	741,39		54,11				
	749	29,57	0,69	8,95	16,99	749,3	29,58	8,95	702,48		51,27				
	800	29,57	0,69	7,59	16,99	800,3	29,58	7,60	636,85		46,48				
	851	29,57	0,69	6,35	16,99	851,3	29,58	6,36	566,69		41,36				
	902	29,57	0,69	5,30	16,99	902,3	29,58	5,30	501,20		36,58				
1260	29,57	0,69	-0,01	16,99	1260,4	29,58	-0,01	-0,88	0,00						

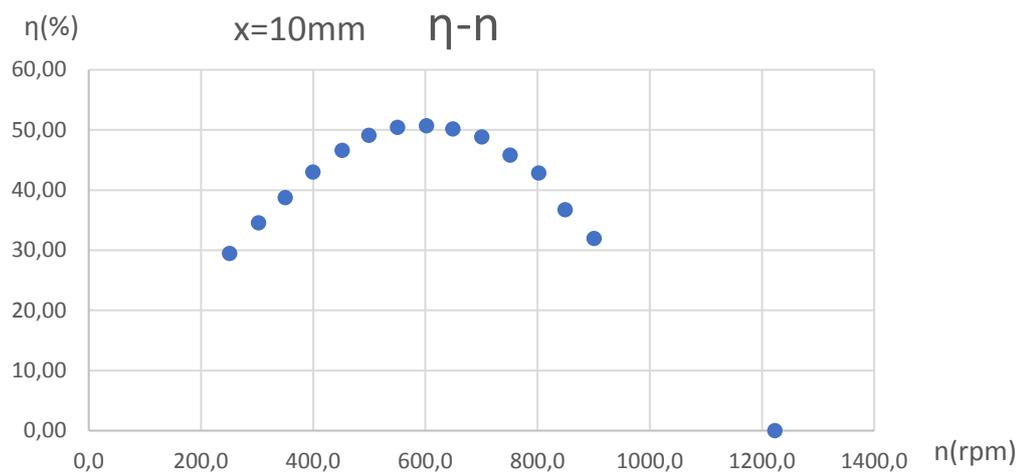
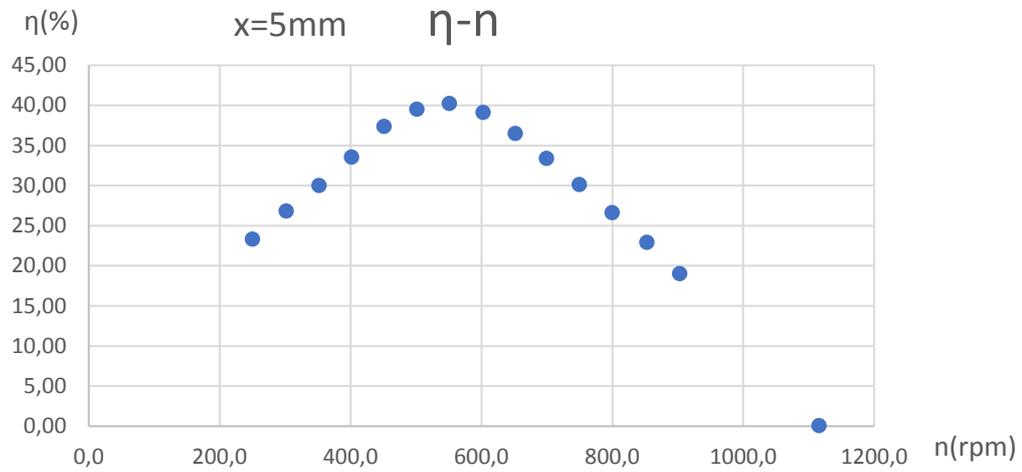


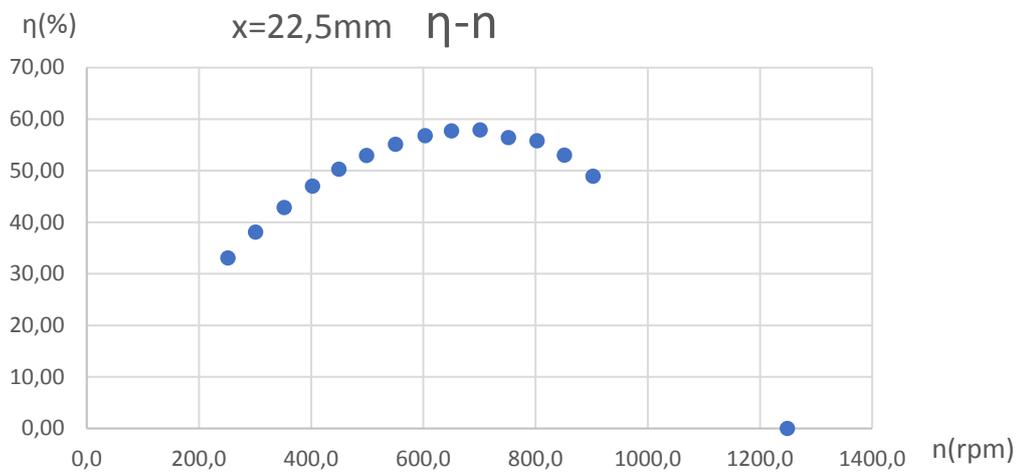
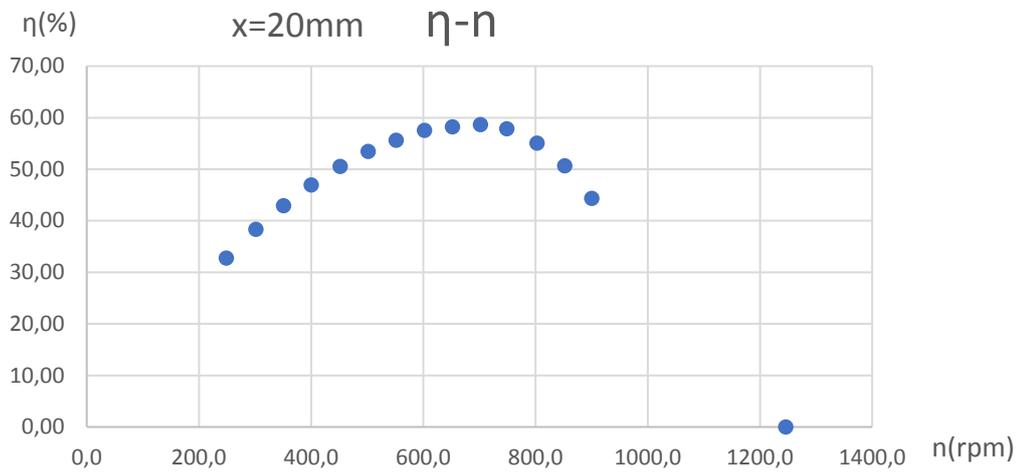
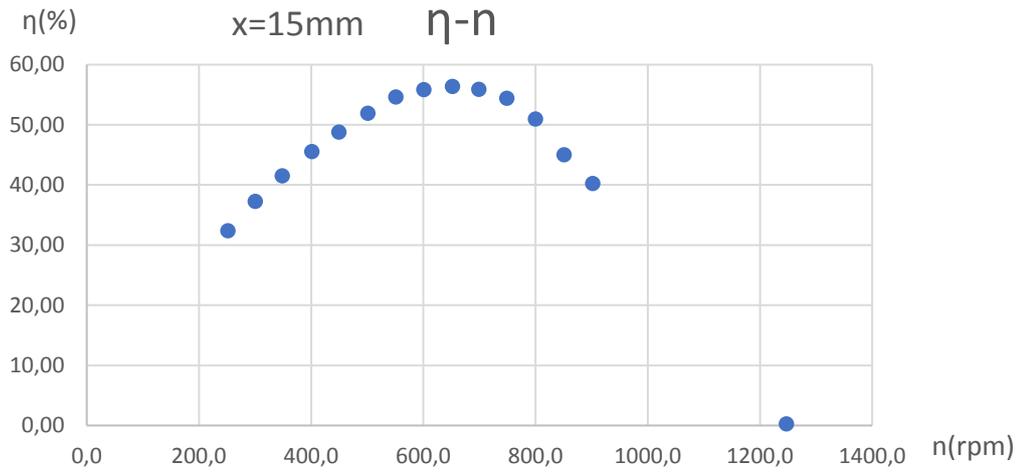
GRÁFICAS OBTENIDAS

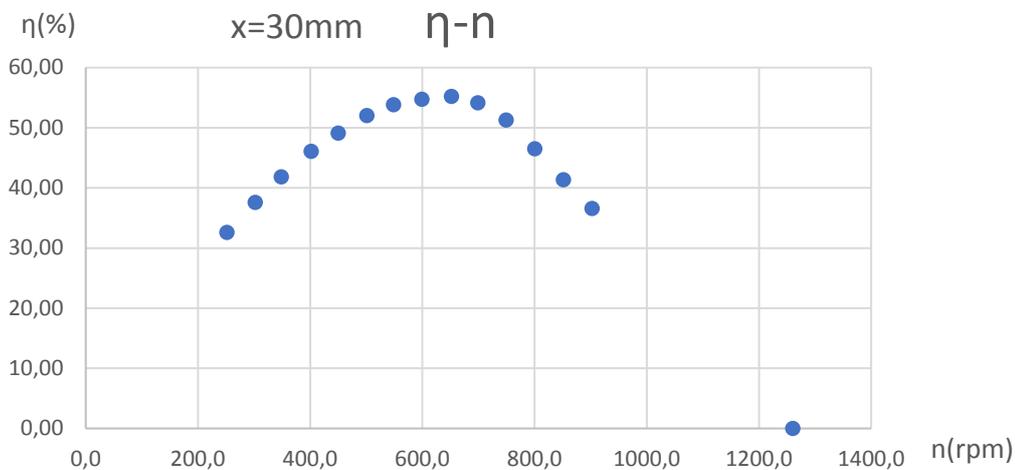
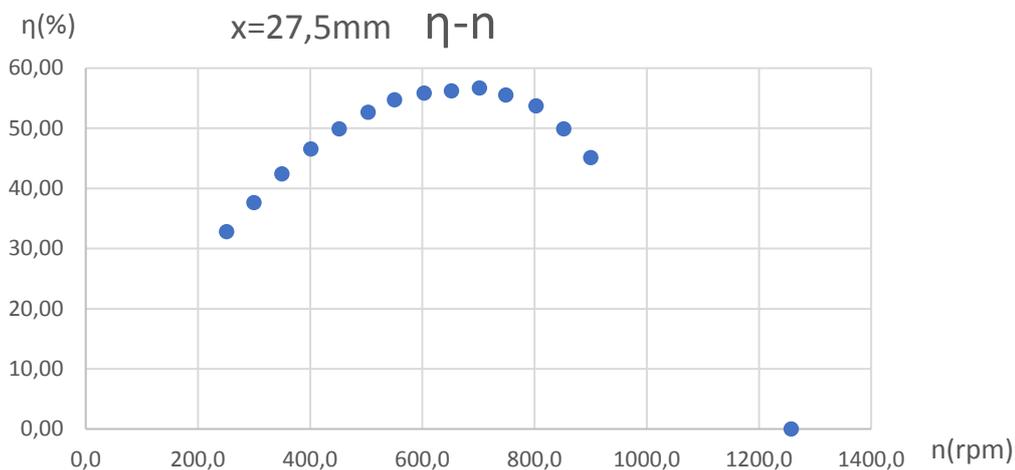
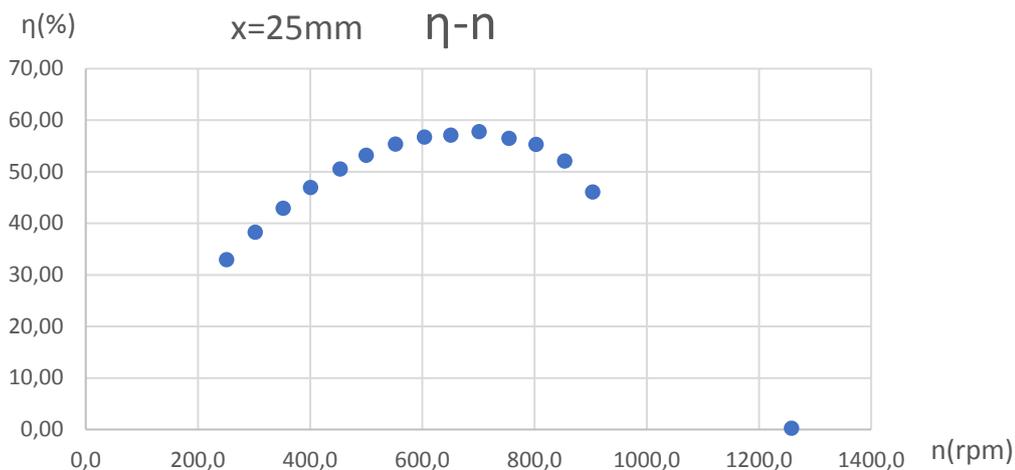




Para cada posición del micrómetro (x), obtenemos las siguientes gráficas:

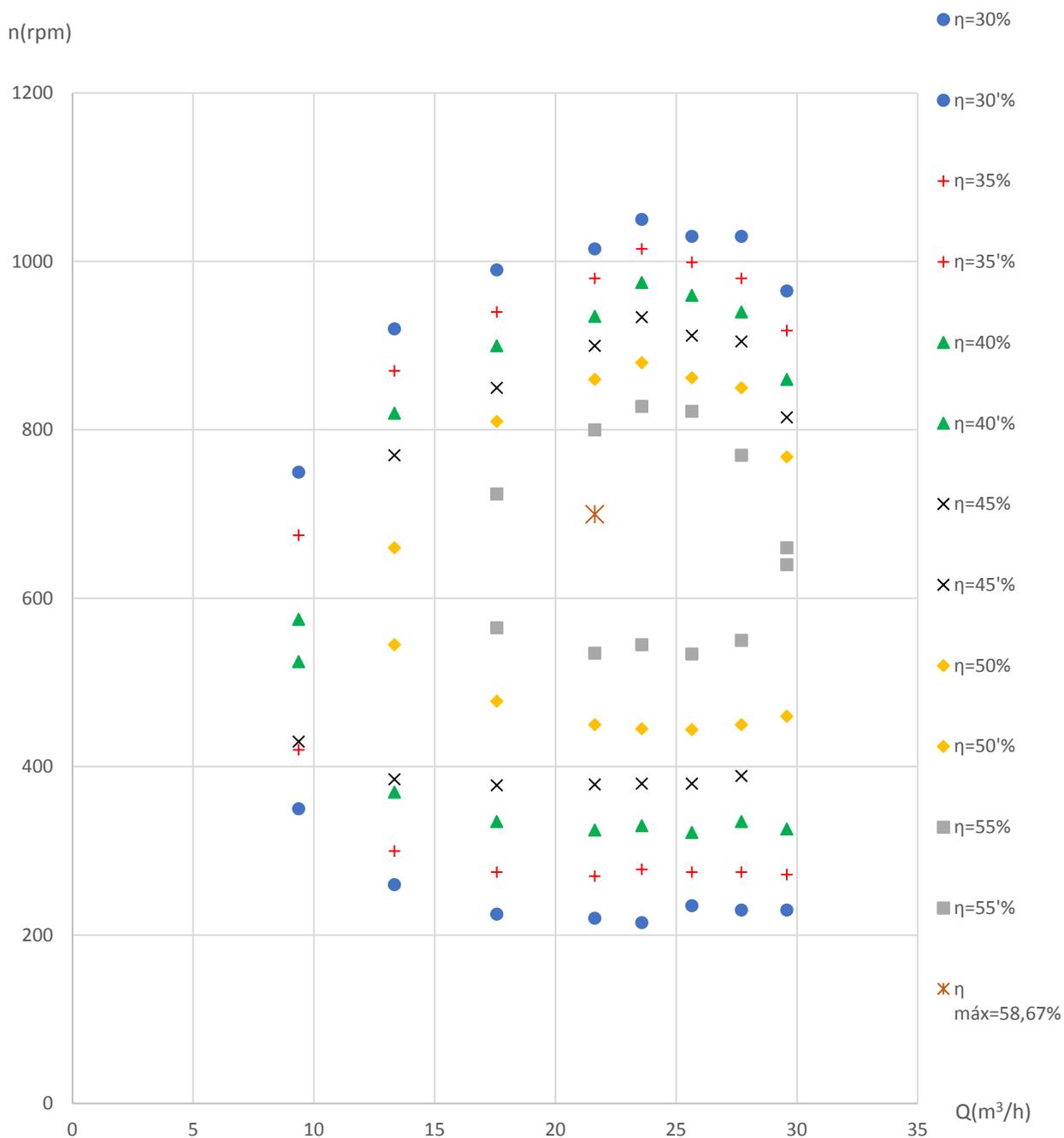








Colina de rendimientos η - Q





La gráfica anterior corresponde a una “Colina de Rendimientos”. Muestra las curvas de isorrendimiento en un diagrama de velocidad angular frente a caudal $n(\text{rpm})$ - $Q(\text{m}^3/\text{h})$.

De la colina de rendimientos, se puede ver que el punto de rendimiento máximo ($\eta=58,67\%$) se encuentra para una velocidad angular $n = 701,9\text{rpm}$ y para una apertura del micrómetro de $x=20\text{mm}$, o lo que es lo mismo, para un caudal de $Q = 21,6\text{m}^3/\text{h}$.

Ese punto de máximo rendimiento se toma como punto de diseño de la turbina, y para dicho punto se calculan los parámetros que se proponen en el guion. Estos parámetros son importantes de cara al análisis de los resultados, de modo que se hará referencia a ellos en el apartado de conclusión.

CÁLCULO DE PARÁMETROS EN EL PUNTO DE DISEÑO

En el punto de diseño:

n : 702 rpm

x : 20 mm

H_{neta} : 17 m

P_{eje} : 587,81 W = 0,788CV

Llegado a este punto, estamos en condiciones de calcular la “velocidad específica” en función de la potencia (n_s ; n^0 de Kammerer), y la velocidad específica adimensional (ω_s).

$$n_s(\text{CV}) = \frac{n(\text{rpm}) \cdot \sqrt{P_{\text{eje}}(\text{CV})}}{H_{\text{neta}}^{\frac{5}{4}}} = \frac{702 \cdot \sqrt{0,788}}{17^{5/4}} = 18,05$$

$$\omega_s(\text{CV}) = \frac{\omega \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{eje}}}{\rho}}}{(g \cdot H_{\text{neta}})^{\frac{5}{4}}} = \frac{702 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \sqrt{\frac{0,788}{1000}}}{(9,81 \cdot 17)^{\frac{5}{4}}} = 3,44 \cdot 10^{-3}$$



CONCLUSIONES

En primer lugar, se puede destacar de la gráfica caudal frente a apertura del micrómetro $Q(\text{m}^3/\text{h})-x(\text{mm})$ que, como era de esperar, existe una relación directamente proporcional entre estos dos parámetros. De manera que las gráficas de colinas de rendimientos $n(\text{rpm})-x(\text{mm})$, y $n(\text{rpm})-Q(\text{m}^3/\text{h})$ son análogas.

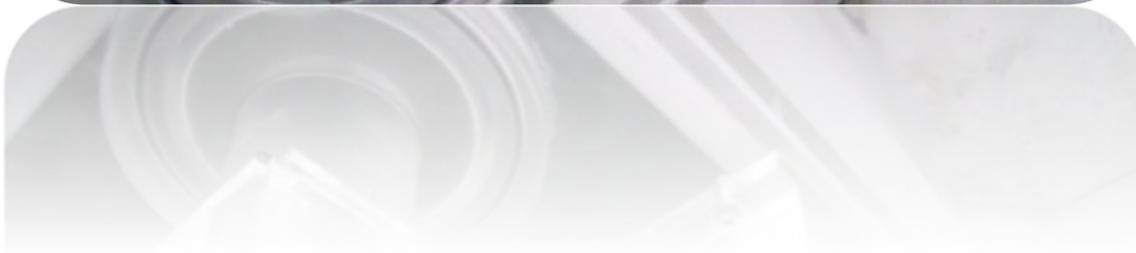
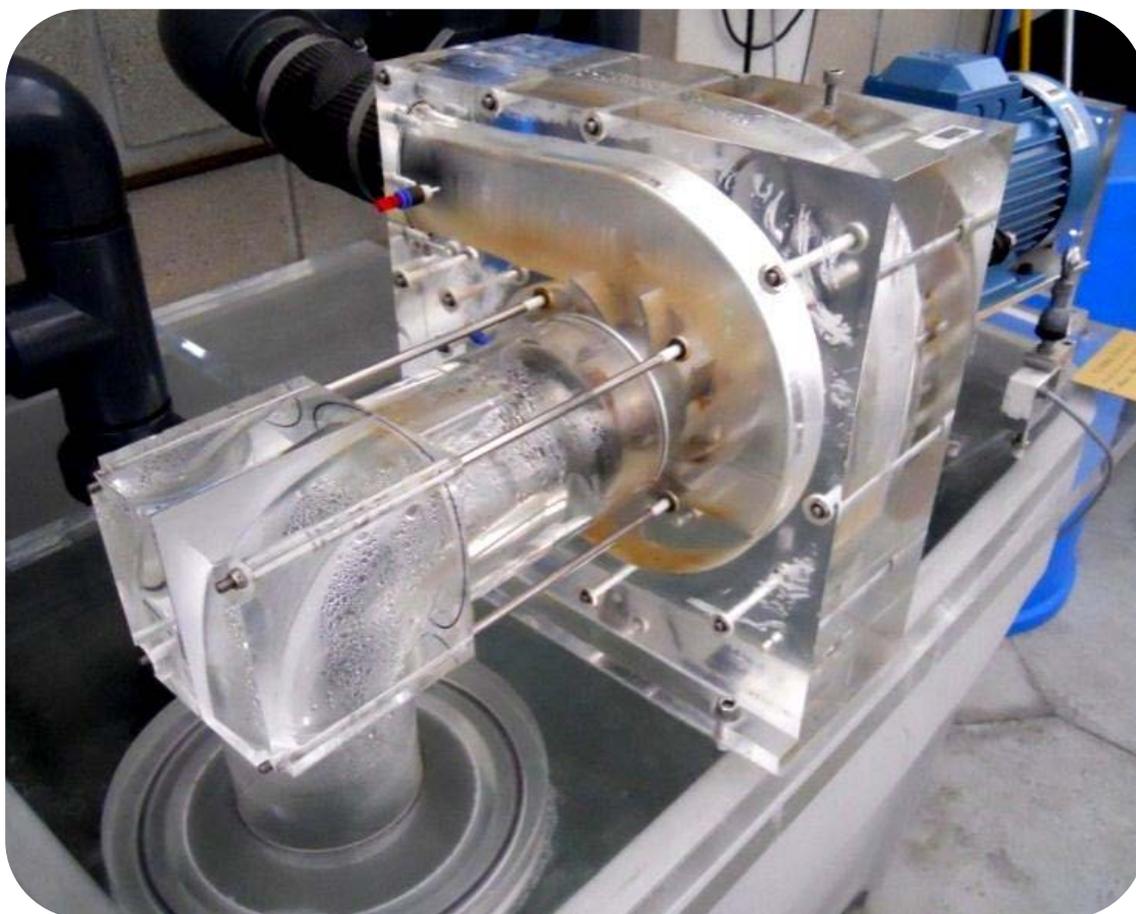
A la vista de los resultados obtenidos, se ha llegado a la conclusión de que el punto de diseño, para un salto de agua de 17 metros, es el correspondiente a una velocidad de rotación de la turbina de 702 rpm y una apertura del inyector de 20 mm ($Q=21,6 \text{ m}^3/\text{h}$ y $P=1,13 \text{ bar}$), como se observa en la colina de rendimientos. En estas condiciones se consigue una potencia en el eje de 587,81W (0,788CV) y una velocidad específica de 18,05 (considerando el valor de potencia en el eje en CV).

Por otra parte, el rendimiento máximo, que se da en el punto de diseño, es del 58,67%. Este valor es inferior al que se suele obtener en este tipo de turbinas ($\approx 85\%$), debido a las pérdidas que se producen en el inyector y al reducido tamaño de la turbina utilizada (turbina que tiene únicamente finalidad didáctica). Se observa en la colina de rendimientos que las curvas de isorrendimiento son muy planas. Es decir, que si se varía adecuadamente la velocidad de la turbina (aumentar la velocidad de la turbina cuando disminuye el caudal); se pueden lograr unos rendimientos bastante constantes para un rango de caudales amplio. Esto es natural, ya que como se ha visto en la introducción las turbinas Crossflow funcionan con un rendimiento aceptable para un gran rango de caudales.

Otra de las conclusiones importantes que podemos sacar tanto de la colina de rendimientos, como de las gráficas $\eta_{\text{total}}(\%)-n(\text{rpm})$ es que efectivamente, para cada apertura del micrómetro, el rendimiento total de la turbina aumenta a medida que aumenta $n(\text{rpm})$ hasta llegar al máximo situado alrededor de las 700rpm (para las aperturas $x=5\text{mm}$ y $x=10\text{mm}$ el rendimiento máximo se produce a velocidades más bajas, pero no son puntos relevantes por ser de rendimientos muy bajos), y a partir de ahí, decrece de nuevo hasta el punto de rendimiento cero que se produce cuando la turbina está embalada. Por tanto, se ha cumplido el objetivo de acercarse al punto de máximo rendimiento de forma progresiva y precisa. El punto de embalamiento se produce a unas revoluciones cada vez mayores al ir abriendo el inyector.

PRÁCTICA 1

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA KAPLAN





OBJETIVOS

- Comprender el funcionamiento de una turbina Kaplan y conocer sus componentes.
- Deducir experimentalmente las curvas del rendimiento total de la turbina (η_t), del caudal (Q) y de la potencia en el eje (Poteje) en función de la velocidad n (rpm) para diversos grados de apertura del distribuidor y para una orientación fija de los álabes del rodete, con **altura neta** cte. en el entorno de **$H = 8$ m**. El salto de agua lo simularemos con una bomba centrífuga, en un circuito cerrado.
- Dibujar las curvas de isorrendimiento, colinas de rendimiento, (considerando el rendimiento total) en un diagrama (n , grado de apertura del distribuidor) para una altura neta uniforme de $H = 8$ m.
- Realizar la gráfica (grado de apertura del rodete, grado de apertura del distribuidor) que relacione ambos parámetros para la obtención del punto de máximo rendimiento, e indicar cuánto vale dicho rendimiento y la velocidad (n) a la que se encuentra.
- Analizar los datos y gráficos obtenidos, ver la relación de estos con la turbina Kaplan y sacar las conclusiones pertinentes.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Funcionamiento de la turbina Kaplan

La turbina Kaplan es una turbina de reacción, es decir, la energía potencial que posee el flujo de agua al entrar en la turbina se transforma en energía cinética y de presión íntegramente en el rodete, siendo la presión a la salida del mismo menor que a su entrada.

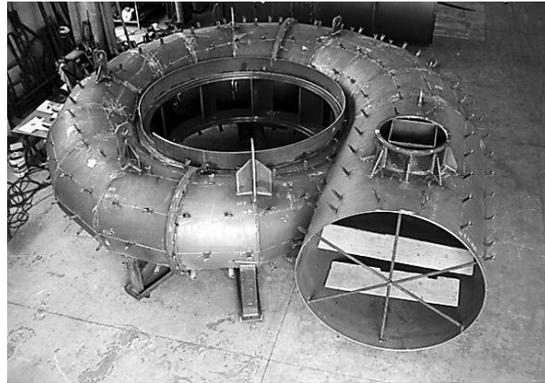
Además, es una turbina de flujo axial, ya que el fluido se mueve en la dirección del eje de la máquina. El fluido suele entrar en la máquina con una rotación, normalmente generada por la cámara espiral o por álabes directores situados a la entrada. Al pasar por los álabes de la turbina esta rotación es absorbida. A la salida de los álabes el fluido sigue moviéndose en dirección axial pero la rotación ha desaparecido casi completamente. Es precisamente esa variación (rotación – no rotación) la que encierra la energía que absorbe la turbina.

Por otra parte, la principal característica de las turbinas Kaplan es la posibilidad de regular la orientación de los álabes del rodete. Por eso se las suele llamar de doble regulación, debido a que puede variarse tanto el caudal de entrada de agua como el ángulo de las palas del rodete, adaptándose muy bien a cualquier carga y permitiendo obtener siempre el máximo rendimiento. Tiene pues una curva de rendimiento plana.

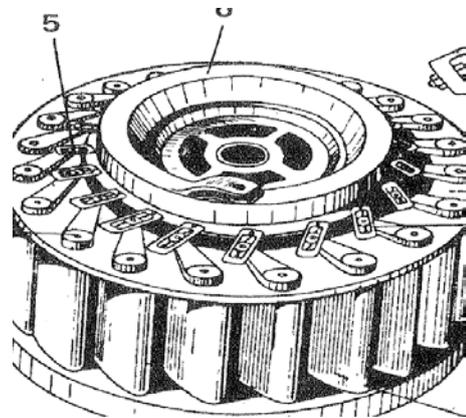
Son adecuadas para flujos de pequeña altura y gran caudal. El inconveniente que tiene es su elevado precio en comparación con las turbinas hélice, a causa del mecanismo de orientación de los álabes y de la doble regulación, que exige dos servomotores, dos válvulas de distribución de aceite y el combinador.

Componentes de la turbina Kaplan

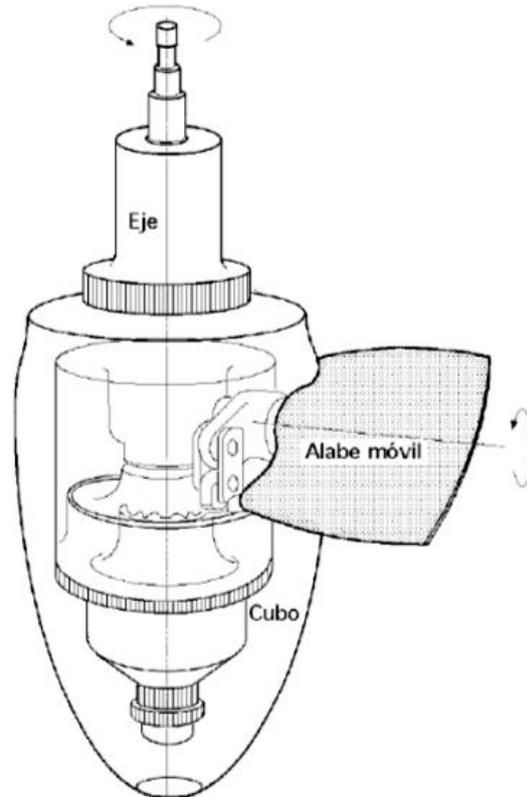
- Cámara espiral:** La cámara espiral es el órgano encargado de realizar la admisión del agua a la turbina y su función es doble: transformar la energía de presión del fluido en energía cinética y conseguir una admisión uniforme a través de toda la circunferencia del rodete mediante un órgano móvil llamado distribuidor. Para alturas H importantes, la caja espiral es metálica y de sección generalmente circular; en cambio, para pequeñas alturas se construye de hormigón y de sección casi rectangular. En el caso de la turbina utilizada en las prácticas la sección es circular principalmente, pues aunque la turbina y la altura son pequeñas, se ha elegido esta solución por motivos didácticos.



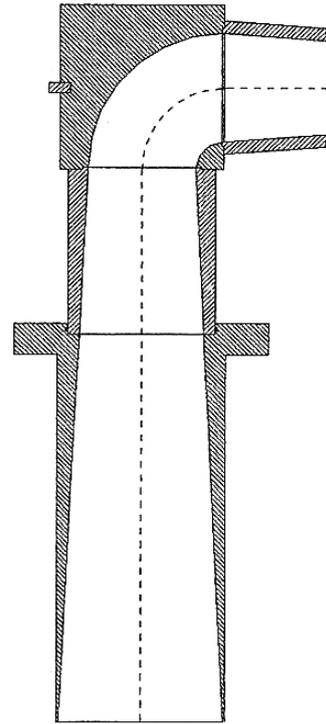
- Distribuidor Fink:** Una vez hemos conseguido una distribución uniforme del agua y la transformación de la energía del fluido de presión en velocidad, pasamos al distribuidor Fink. Su misión es recoger todo el agua de la cámara espiral y prepararla para la entrada en el rodete de la turbina, pudiéndose regular el caudal de funcionamiento de la misma mediante el accionamiento de los álabes del distribuidor. Estos álabes son nueve para asegurar el solapamiento entre ellos y poder cerrar completamente el paso del agua, y tienen forma de espiral con un ángulo de tangencia de 20° . Así se consigue que para la posición de diseño los álabes no interfieran en el flujo del agua, con lo que no sufrirán ningún esfuerzo. Sólo en el caso de variar la posición de los álabes fuera del punto de diseño, el agua ejercerá un momento sobre ellos que los cambiará de su orientación original.



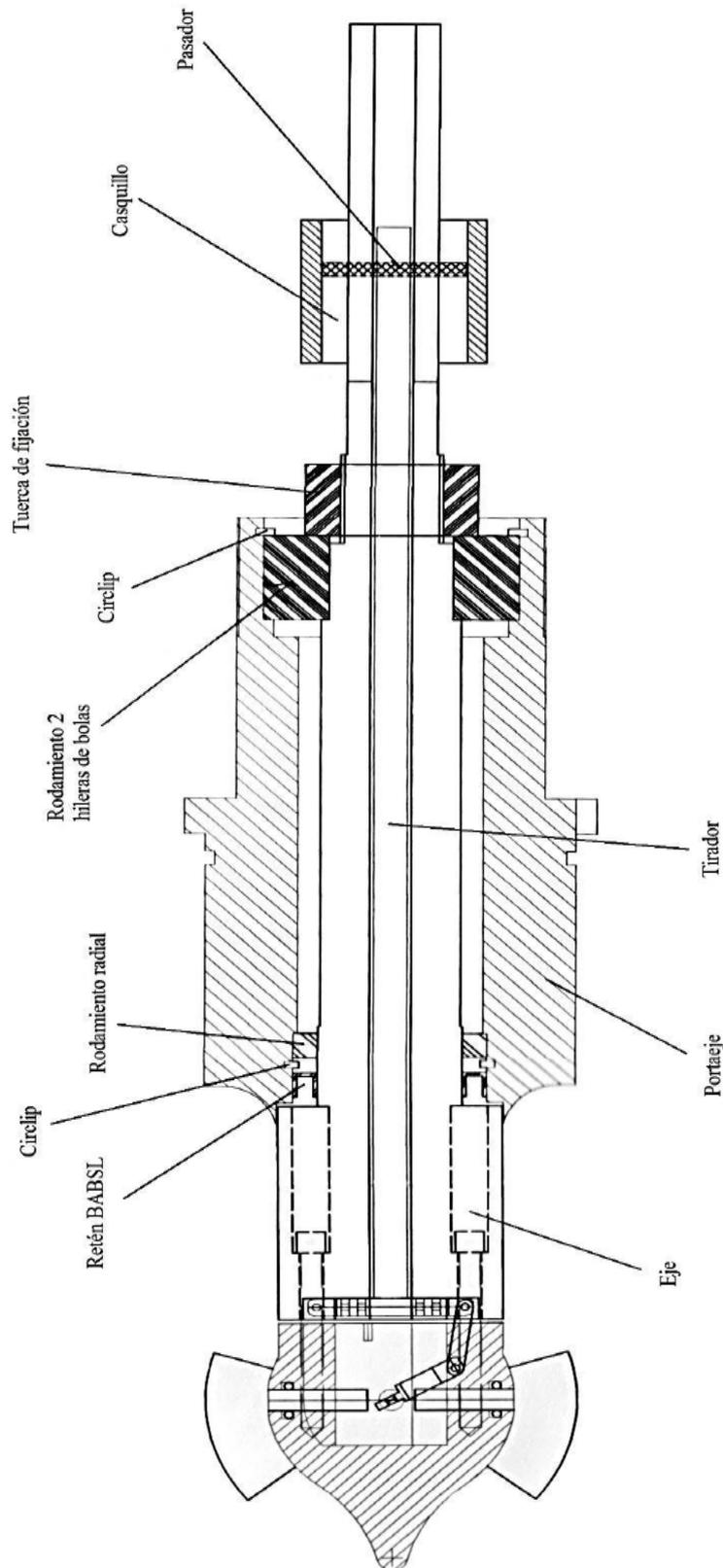
- Rodete:** El rodete es sin lugar a dudas la pieza más importante de la turbina, pues es en este órgano donde se realiza el intercambio de energía entre el agua y la máquina. Está formado por el cubo del rodete y los álabes. Se llama cubo a la pieza donde van colocados los álabes móviles. El cubo del rodete forma parte del eje de la máquina y es a través de él por donde la energía absorbida al agua es sacada al exterior. Su forma es esférica en la parte central de las palas y en la parte de salida tiene una nariz redondeada. La función de esta nariz es la de ir aumentando la sección de paso del agua de una manera suave y progresiva para evitar desprendimientos en la capa límite del agua. Además, el cubo del rodete alberga todo el sistema de accionamiento del giro de los álabes de la turbina, que puede verse con detenimiento en la sección siguiente. Por otra parte, el número de álabes del rodete está íntimamente relacionado con la altura neta H y con el número específico de revoluciones n_s , factores de los que depende el peligro de cavitación. El número de álabes se ha de seleccionar con el fin de reducir este peligro. Como al aumentar H aumenta el peligro de cavitación, el número de álabes habrá de ser tanto mayor cuanto mayor sea H . Sin embargo el número de álabes no puede ser mucho mayor que ocho, porque al aumentar la "superficie mojada" el rendimiento empeora. En nuestro caso, el número de álabes es cuatro. Además, al aumentar con la altura neta el número de álabes y los esfuerzos que éste soporta, las dimensiones del cubo deberán ser mayores. Con ello se reduce la sección de paso para el flujo, empeora el rendimiento hidráulico de la turbina y aumenta el peligro de cavitación. Tal es la barrera que impide la instalación de turbinas Kaplan en saltos mayores de 70 u 80 metros.



- Tubo de descarga:** El tubo de descarga, llamado también tubo de aspiración por trabajar en depresión, forma parte de la turbina; en consecuencia, la sección final de aquél podría considerarse como sección de salida S de ésta. Su función es recuperar toda la energía cinética posible y volverla a energía de presión aprovechable por la turbina, así como aumentar la altura del salto hasta la superficie libre del agua del depósito. A la salida de la turbina el agua lleva una velocidad axial bastante alta (de unos 4 m/s según el cálculo teórico). Si esta agua sale al depósito, toda esa velocidad se estrellará contra el agua y se perderá en turbulencias y calor. Sin embargo, si reducimos su velocidad antes de verterla al depósito, recuperaremos toda esa energía para la turbina. En la práctica, donde las alturas de salto no son muy grandes y las velocidades tienen mucha importancia, el tubo de aspiración adquiere una importancia capital, ya que permite aprovechar al máximo la poca altura de la que disponen y recuperar toda la energía que pueda llevar todavía el agua. En este tipo de turbinas el tubo de descarga puede representar el 20 o 30% del rendimiento de la turbina. Su diseño ideal es muy sencillo: tan sólo un tronco de cono con un ángulo de apertura de 10 a 20° es suficiente para asegurar una recuperación de la presión sin que se produzca desprendimiento en la capa límite del fluido. En la práctica suele ser más complicado porque hay que añadir un codo de 90° y el tubo de aspiración rara vez puede ser circular. En nuestro caso también necesitamos un codo de 90° para cambiar la dirección de la salida del agua, ya que la máquina es de eje horizontal y necesitamos bajar el agua hasta el depósito. En el codo la sección de paso se mantiene constante para facilitar su mecanizado y para reducir al máximo las pérdidas en él.

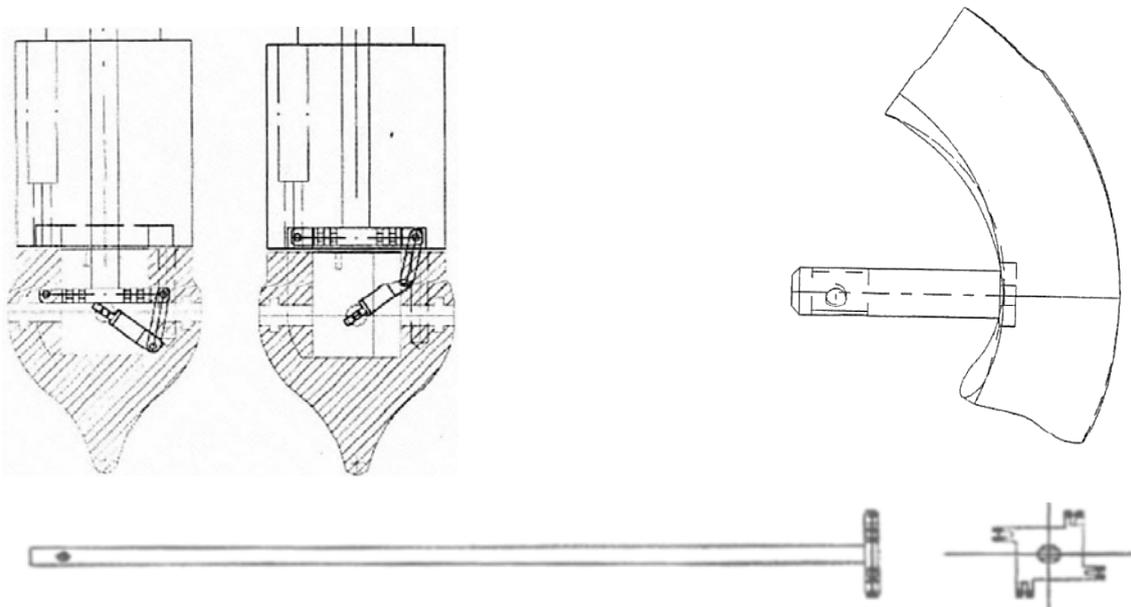


Mecanismo de regulación de los álabes del rodete



En las turbinas Kaplan convencionales el mecanismo para el giro de los álabes del rodete es accionado por un servomotor de aceite, mandado por el sistema de regulación. El mecanismo es del tipo biela manivela, igual que en la turbina que se utilizará en esta práctica, sólo que en este caso el accionamiento es manual.

El rodete de la turbina del laboratorio consta de cuatro álabes, los cuales están unidos mediante un sistema biela-manivela a un vástago coaxial con el eje de la turbina. El sistema está diseñado de manera que el desplazamiento del vástago en dirección longitudinal (dirección del eje de la turbina), produzca mediante la acción de los mecanismos biela-manivela una rotación en los cuatro álabes del rodete. De esta forma, cuando el vástago se desplaza con sentido hacia el rodete, los álabes tienden a cerrarse, mientras que si se desplaza alejándose del rodete, estos tienden a abrirse.



El choque del agua que pasa a través del rodete ejerce una fuerza contra los álabes que tiende a abrirlos, es decir, tienden a desplazar el vástago alejándolo del rodete. De esta forma, se puede conseguir una regulación restringiendo el desplazamiento de dicho vástago.

Con este propósito de hacer de tope para el vástago se diseñan una serie de placas metálicas desmontables de distintos tamaños. En total son seis placas numeradas del uno al seis de mayor a menor, que hacen posible la siguiente regulación.

Nº de placa montada	Grado de apertura de los álabes del rodete (%)
1	16,6
2	33,3
3	50
4	66,7
5	83,3
6	100



Como puede verse, se trata de una regulación mediante saltos discretos de 16,6%. Las placas se montan y desmontan fácilmente de forma manual (sujetas mediante dos tornillos).



MONTAJE EXPERIMENTAL



DESARROLLO ANALÍTICO

Altura neta de la turbina

Por definición, la altura neta de la turbina es toda la altura que ha entregado o cedido el agua incluyendo pérdidas y energía entregada al rodete. Siempre que se habla de altura en una turbina, se entiende que se refiere a altura neta, salvo que se especifique que se trate de altura de Euler o altura de pérdidas; que son otras alturas típicas de las turbinas. De modo que dicha altura neta se denotará con la letra H.

Dada su definición, se deduce que la altura neta se obtiene de la diferencia de alturas totales (altura geométrica, altura de velocidad y altura de presión) del fluido a la entrada y a la salida de la turbina. Si aplicamos Bernoulli entre la entrada y la salida de la turbina tenemos:

$$H = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + Z \right)_{Entrada} - \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + Z \right)_{Salida} \quad (1)$$

Consideramos el nivel del agua del tanque $z=0$ y en ese punto $P=P_{atm}$:

$$H = \frac{P_{man_e} + \rho g Z_{man_e}}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} + Z_e - \frac{P_{atm} - \rho g Z_s}{\rho g} - \frac{v_s^2}{2g} - Z_s \quad (2)$$

$$H = \frac{P_{man_e} + \rho g Z_{man_e}}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} + Z_e - \cancel{\frac{P_{atm}}{\rho g}} + \cancel{\frac{\rho g Z_s}{\rho g}} - \cancel{Z_s} - \frac{v_s^2}{2g}$$

Tenemos:

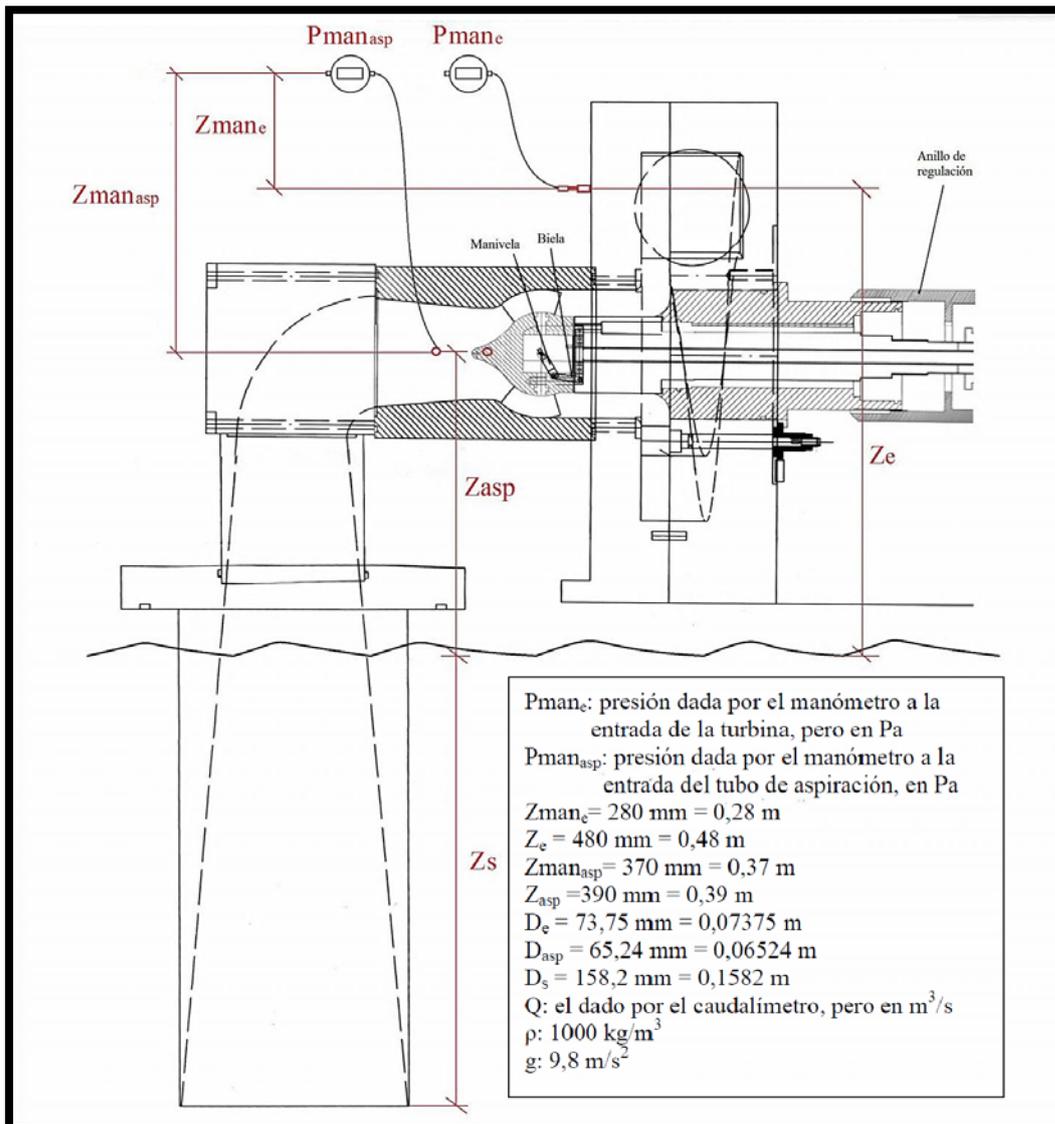
$$H = \frac{P_{man_e}}{\rho g} + Z_{man_e} + Z_e + \frac{v_e^2}{2g} - \frac{v_s^2}{2g} \quad (3)$$

Por último, como $Q=V \cdot S$:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (4)$$

Por tanto, la fórmula general para el cálculo de la altura neta queda:

$$H = \frac{P_{man_e}}{\rho g} + Z_{man_e} + Z_e + \frac{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_e^2}\right)^2}{2g} - \frac{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_s^2}\right)^2}{2g} \quad (5)$$





Sustituyendo los valores de la figura X en la fórmula (5), se obtiene la altura en función del caudal y de la presión de entrada, en unidades del SI.

$$H = \frac{P_{man_e} \cdot 10^5}{9,8 \cdot 1000} + 0,28 + 0,48 + \frac{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot 0,07375^2}\right)^2 - \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot 0,1582^2}\right)^2}{2 \cdot 9,8} \quad (5')$$

Haciendo uso de la ecuación anterior, se escoge el valor de presión $P_{man_e}=0,67$ bar, y el valor de caudal $Q=45,6$ m³/h; que dan como resultado el valor de $H \approx 8$ m con el que se quiere trabajar. Se elige este valor de altura porque supone un mayor aprovechamiento práctico, ya que se obtienen conjuntos de datos y gráficos de calidad y relevantes para el posterior análisis de la turbina.

Cuando se estén realizando las medidas para una posición fija del distribuidor y de los álabes del rodete, al ir aumentando la velocidad la presión indicada por el manómetro oscilará, cambiará aleatoriamente, lo que obligaría a estar continuamente jugando con las válvulas para mantener la altura neta constante. Para evitar esto se tomará nota de la presión del manómetro en cada medida, anotando esos pequeños cambios caóticos. Posteriormente se transformarán las medidas obtenidas, mediante las relaciones de semejanza, a las que se habrían obtenido si realmente la altura neta hubiera sido, rigurosamente, **8 m**.

Altura de pérdidas

Son las pérdidas a lo largo de la tubería de aspiración.

Se aplica Bernoulli entre la entrada y la salida de la tubería de aspiración:

$$h_{asp} = \left(\frac{P_{asp}}{\rho g} + \frac{v_{asp}^2}{2g} + Z_{asp} \right)_{Entrada\ asp} - \left(\frac{P_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} + Z_s \right)_{Salida\ asp} \quad (6)$$

Simplificando:

$$h_{asp} = \frac{P_{asp}}{\rho g} + \frac{v_{asp}^2}{2g} + Z_{asp} - \frac{v_s^2}{2g} \quad (6')$$

Y entonces:

$$h_{asp} = \frac{P_{man_{asp}}}{\rho g} + Z_{man_{asp}} + Z_{asp} + \frac{v_{asp}^2}{2g} - \frac{v_s^2}{2g} \quad (6'')$$

Ahora aplicando $Q=v \cdot S$, y sustituyendo los valores de la figura x obtenemos:

$$h_{asp} = \frac{P_{man_{asp}} \cdot 10^5}{9,8 \cdot 1000} + 0,37 + 0,39 + \frac{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot 0,06524^2}\right)^2 - \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot 0,1582^2}\right)^2}{2 \cdot 9,8} \quad (6''')$$

Es posible que en la práctica se obtengan valores negativos de h_{asp} , lo cual supondría que tendríamos ganancias, en vez de una pérdida de altura en la tubería de aspiración. Esto, lógicamente, no puede suceder en la realidad. Lo que sucede es que en la ecuación de la energía (ecuación 6''') no se ha tenido en cuenta la energía de rotación del fluido a la salida del rodete, habiéndose considerado únicamente la componente perpendicular a la sección de la tubería. Si fuéramos capaces de calcular este sumando, las pérdidas de altura en la tubería de aspiración aumentarían y no se obtendrían valores negativos.

Potencia neta

Es la que el agua entrega a la turbina, la que pierde el flujo. Es la potencia que tiene el agua a la entrada de la turbina menos la que tiene a la salida (que se ha aproximado a cero). Analíticamente queda expresada:

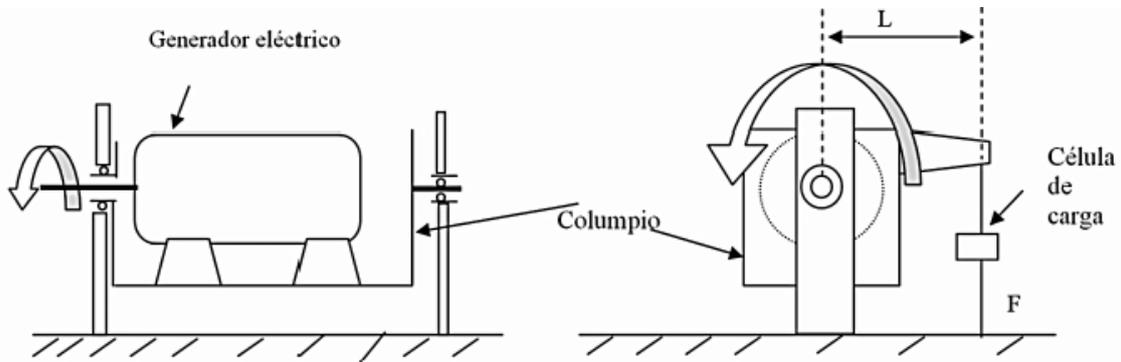
$$P_{Neta} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (7)$$

Potencia útil

Es la potencia mecánica que entrega la turbina en su eje (P_{eje}). Se obtiene por tanto como el producto de la velocidad angular con que gira dicho eje por el par al que está sometido. La velocidad angular se mide mediante un sensor inductivo que detecta el paso de los dientes de una pequeña corona dentada que tiene el eje. Mientras que la medida del momento torsor se obtiene mediante dos aparatos distintos, con una célula de carga, o bien mediante un transductor de par.

La célula de carga es un aparato que mide el par de la siguiente forma. Se coloca coaxial a la turbina un generador eléctrico que absorbe todo el par del eje. Y el generador eléctrico se coloca a su vez anclado a un columpio que también es coaxial con el eje de la turbina. El par exterior que se ha de hacer sobre el columpio para que no gire (En la ilustración x correspondería con el producto de $L \times F$) es igual al momento torsor que entrega la turbina y absorbe el generador. De modo que lo que hace la célula de carga es medir la fuerza (F en la Ilustración x) que compensa el par de fuerzas de la turbina, lo multiplica por el valor fijado L y proporciona el valor del momento torsor.

La explicación del transductor de par es más sencilla ya que mide el par torsor mediante galgas extensiométricas.



Estas tres medidas aparecen en los displays que se encuentran bajo el panel eléctrico del variador de frecuencia.

De este modo, la potencia útil nos queda:

$$P_{\text{útil}} = P_{Eje} = M \cdot \omega \quad (8)$$

Rendimiento total

El rendimiento total viene definido como:

$$\eta_{\text{Total}} = \frac{P_{Eje}}{P_{\text{Neta}}} \quad (9)$$

Considerando que el rodete está bien diseñado y que todo el caudal impacta con los álabes del rodete obtendríamos que el rendimiento volumétrico es la unidad ($\eta_{\text{Volumétrico}}=1$). Y, por tanto, quedaría:

$$\eta_{\text{Total}} = \eta_{\text{Rodete}} \cdot \eta_{\text{distribuidor}}$$



PARÁMETROS QUE HAN DE MEDIRSE.

Se hará un conjunto de medidas para distintas aperturas de los álabes del rodete 16,7-33,3-50-66,7 y 83,3%, que se corresponden con el montaje de las placas 2, 3, 4, 5 y 6.

Para cada una de dichas posiciones del rodete, se estudiarán cinco posiciones distintas del distribuidor. Estas posiciones del distribuidor se eligen de manera que hagan posible la obtención de la altura neta $H=8m$ (para aperturas pequeñas del distribuidor, el caudal que se obtiene es demasiado pequeño para obtener $H=8m$), y además, se eligen de manera que estén en el entorno del rendimiento máximo.

Aquí se puede apreciar la tabla que indica que posiciones del distribuidor se ensayan para cada posición del rodete.

El grado de apertura de los álabes del distribuidor se ajustan

mediante la acción de un micrómetro, que hace girar una corona dentada que a su vez mueve unos piñones solidarios a dichos álabes. Seguidamente se muestra la tabla que relaciona la apertura del distribuidor con la medida que marca el micrómetro.

Posición del rodete	Grado de apertura de los álabes del distribuidor (%)
Placa 2 (apertura del 16,7%)	80, 70, 60, 50, 40
Placa 3 (apertura del 33,3%)	60, 50, 45, 40, 30
Placa 4 (apertura del 50%)	65, 60, 50, 40, 30
Placa 5 (apertura del 66,7%)	60, 55, 50, 40, 30
Placa 6 (apertura del 83,3%)	60, 55, 50, 45, 40

Posición del micrómetro(mm)	Grado de apertura de los álabes del distribuidor (%)
6	100
6,59	95
7,18	90
7,77	85
8,36	80
8,95	75
9,54	70
10,13	65
10,72	60
11,31	55
11,90	50
12,49	45
13,08	40
13,67	35
14,26	30
14,85	25
15,44	20
16,03	15
16,62	10
17,21	5
17,88	0



Como puede verse, la tabla anterior relaciona la apertura del micrómetro con la apertura del distribuidor mediante saltos discretos de 1,18mm-5%. Debe remarcarse que los valores de la tabla se corresponden con un ajuste del micrómetro concreto. Antes de la realización de la práctica habrá que comprobar que el ajuste sigue siendo el mismo. De no ser así, habría que corregir la tabla (los saltos discretos se mantendrían 1,18mm-5%, pero el punto de completamente cerrado se habría desplazado hasta otra posición del micrómetro), habría una translación de escala.

Para cada posición rodete-distribuidor se estudia la turbina operando entre 1500 y 2500 rpm, con saltos de 250 rpm. Se toman estos valores de velocidad porque en ese rango se espera encontrar el punto de máximo rendimiento que se da con la placa3. Además, se decide no tomar valores por debajo de 1500 rpm por no hacer la práctica excesivamente larga.

Los datos se tomarán en gráficas de este tipo:

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m^3/h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Siendo:

- Apertura distr: Apertura de los álabes del distribuidor.
- n_o : Velocidad angular orientativa que se buscaría ajustar con el variador de frecuencia.
- n_m : Velocidad angular medida, que podría no ser igual a la orientativa (ya que es difícil ajustar exactamente esas velocidades con el variador de frecuencia).
- Q: Caudal turbinado.
- P_{man_e} : Presión manométrica a la entrada del distribuidor.
- $P_{man_{asp}}$: Presión manométrica a la salida del rodete.
- M: Par torsor, bien de la célula de carga, o bien del transductor de par (podrían no coincidir, aunque lo ideal sería que lo hicieran).



De este modo se facilitan las siguientes tablas para rellenar con los datos obtenidos en el laboratorio.

Placa 2 (apertura del rodete 16,7%)

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						



Placa 3 (apertura del rodete 33,3%)

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						



Placa 4 (apertura del rodete del 50%)

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						



Placa 5 (apertura del rodete 66,7%)

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

**Placa 6 (apertura del rodete 83,3%)**

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						

Apertura distr. (%)	n_o (rpm)	n_m (rpm)	P_{man_e} (bar)	$P_{man_{asp}}$ (bar)	Q (m ³ /h)	M(Nxm) Transductor	M(Nxm) Célula carga
	≈1500						
	≈1750						
	≈2000						
	≈2250						
	≈2500						



CONSTRUCCIÓN DE LAS TABLAS

Para cada apertura del distribuidor se construirá una tabla. A continuación, se muestra un ejemplo de construcción de una de ellas columna a columna.

Las seis primeras columnas son los valores directamente medidos. El par que se incluye en la tabla es el que proporciona el transductor de par y no el de la célula de carga. Esta decisión se debe a que la célula de carga puede acumular varios errores de medida debidos causas aparentemente sin importancia pero que tienen gran repercusión, como la forma en que cuelga el cable del generador eléctrico.

En definitiva, las seis primeras medidas se obtienen directamente del micrómetro y de los valores indicados en los displays.

A partir de aquí se explica la obtención de las columnas restantes.

7ª Columna:

Se calcula la altura neta (H) mediante la expresión (5').

8ª Columna:

De los valores medidos se obtienen diversas alturas netas "H". Debido a las fluctuaciones en las medidas, en vez de obtener una sola "H" se obtienen diversas, aunque muy parecidas. Pues bien, hay que corregir estas medidas a las que se habrían obtenido si la altura neta hubiera sido rigurosamente constante e igual a $H=8\text{m}$.

A los valores de " n_c ", " Q_c ", y " M_c " así obtenidos se les llamará "experimentales corregidos", puntos homólogos.

Cálculo de la velocidad de rotación corregida: $n_c(\text{homóloga})$ es la velocidad de la turbina que corresponde al punto homólogo al medido, pero con: $H_{\text{homóloga}}=8\text{m}$.

$$\frac{H_{\text{homóloga}}}{H} = \left(\frac{n_{\text{homóloga}}}{n}\right)^2 \Rightarrow \text{obtenemos } n_{\text{homóloga}}$$

9ª Columna:

El caudal del punto homólogo al medido y que corresponde a $H_{\text{homóloga}} = 8\text{m}$ se obtiene:

$$\frac{Q_{\text{homólogo}}}{Q} = \frac{n_{\text{homóloga}}}{n} \Rightarrow \text{obtenemos } Q_{\text{homólogo}}$$

10ª Columna:

El par del punto homólogo:

$$\frac{Pot_{\text{homóloga}}}{Pot} = \left(\frac{n_{\text{homóloga}}}{n}\right)^3 = \frac{M_{\text{homólogo}}}{M} \cdot \frac{n_{\text{homóloga}}}{n} \Rightarrow \frac{M_{\text{homólogo}}}{M} = \left(\frac{n_{\text{homóloga}}}{n}\right)^2$$

$$\Rightarrow \text{obtenemos } M_{\text{homólogo}}$$

Ya se tienen los valores “experimentales corregidos” n_c , Q_c , M_c , todos ellos correspondientes a la altura neta $H_{\text{homóloga}} = 8\text{m}$.

A partir de ahora todos los cálculos se harán sobre estos valores, columnas 8, 9 y 10.

11ª Columna:

Potencia útil de la turbina o potencia en el eje, de la ecuación (7)

12ª Columna:

Potencia neta, de la ecuación (8) calculada con el caudal medio de la columna “9”, y la altura neta: $H = 8\text{m}$.

13ª Columna:

Altura de pérdidas de la turbina, obtenida de la ecuación (6’’’).

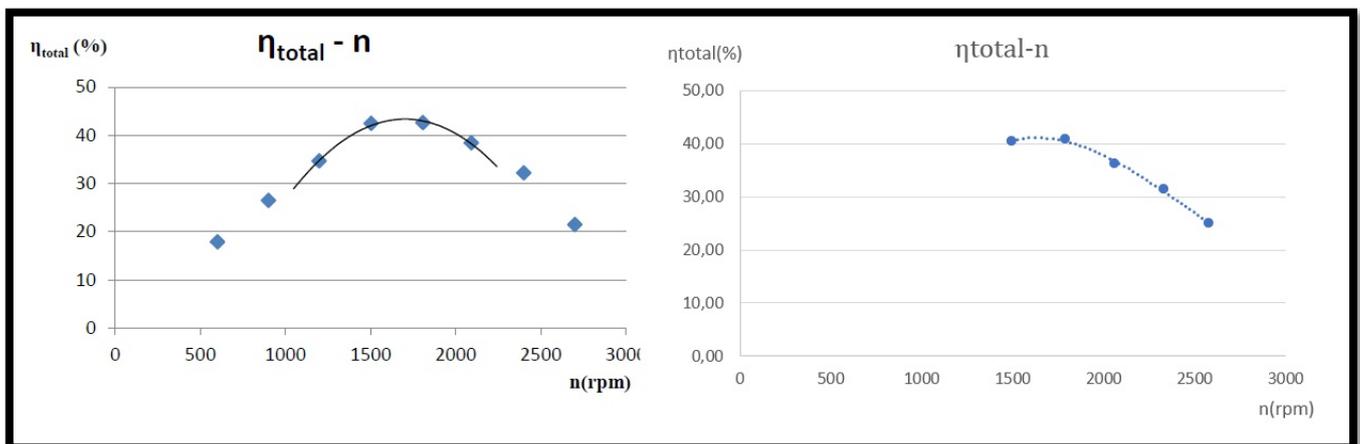
14ª Columna:

Rendimiento total de la turbina, obtenida de la ecuación (9).



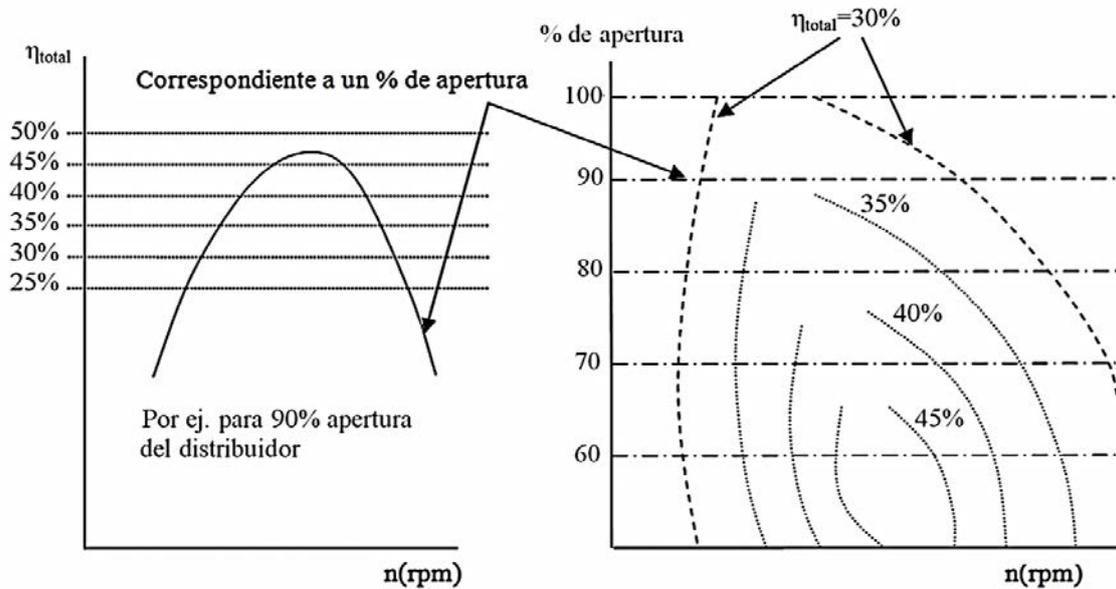
GRAFICAS QUE HAY QUE REALIZAR

- Para cada apertura de los álabes del rodete se realizarán 6 gráficas:
 - Cinco gráficas de rendimiento total (η_{total}) frente a velocidad de la turbina (n). Para cada posición del distribuidor, se representará el rendimiento total (columna 13) respecto al nº de revoluciones de la turbina (columna 8). Si hubiéramos tomado medidas de velocidad desde 500 rpm hasta 2500rpm, se observaría que para cada posición del distribuidor el rendimiento crece conforme se aumentan las revoluciones de la turbina, llega a un máximo y luego decrece, llegando hasta cero cuando la turbina está embalada. Sin embargo, para no hacer demasiado larga la práctica se han estudiado velocidades entre 1500 y 2500 rpm. Esto implica que en algunos casos no veremos ambas vertientes de la curva, sino que solo una de ellas.
 - A continuación, se muestran ejemplos de la curva completa y de la que se espera obtener en esta práctica.





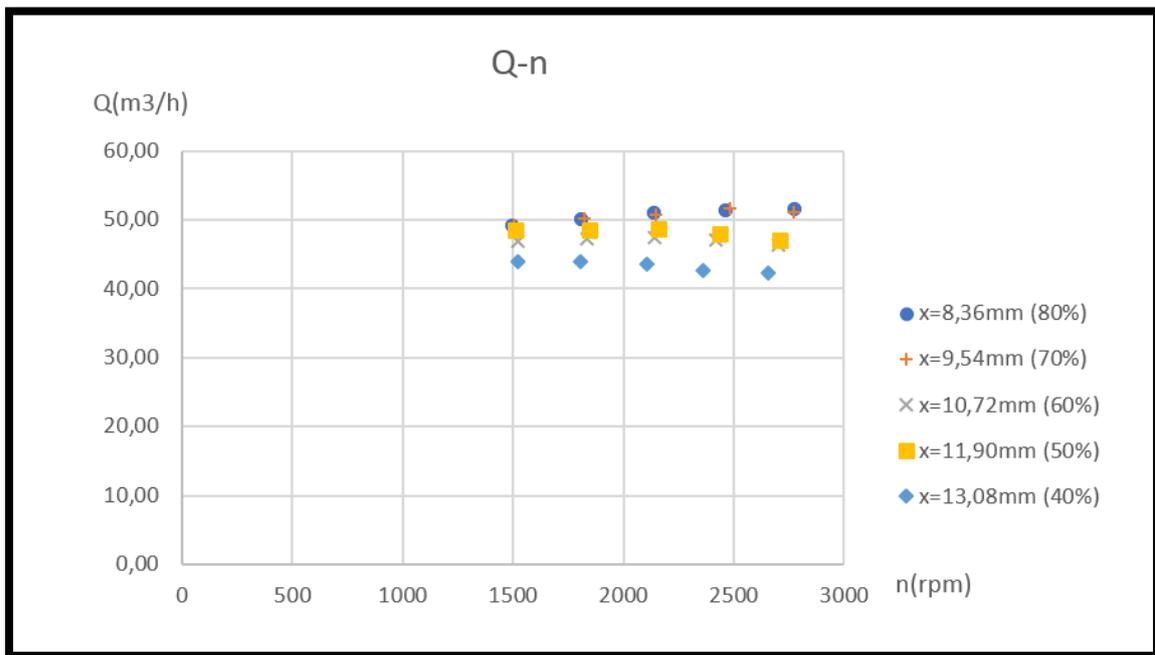
- Una gráfica de colina de rendimientos. De igual forma que ocurría con las curvas $\eta_{total}-n$, la ausencia de medidas por debajo de 1500 rpm hace que en la colina de rendimientos aparezca una curva para cada rendimiento, en lugar de un par de curvas.



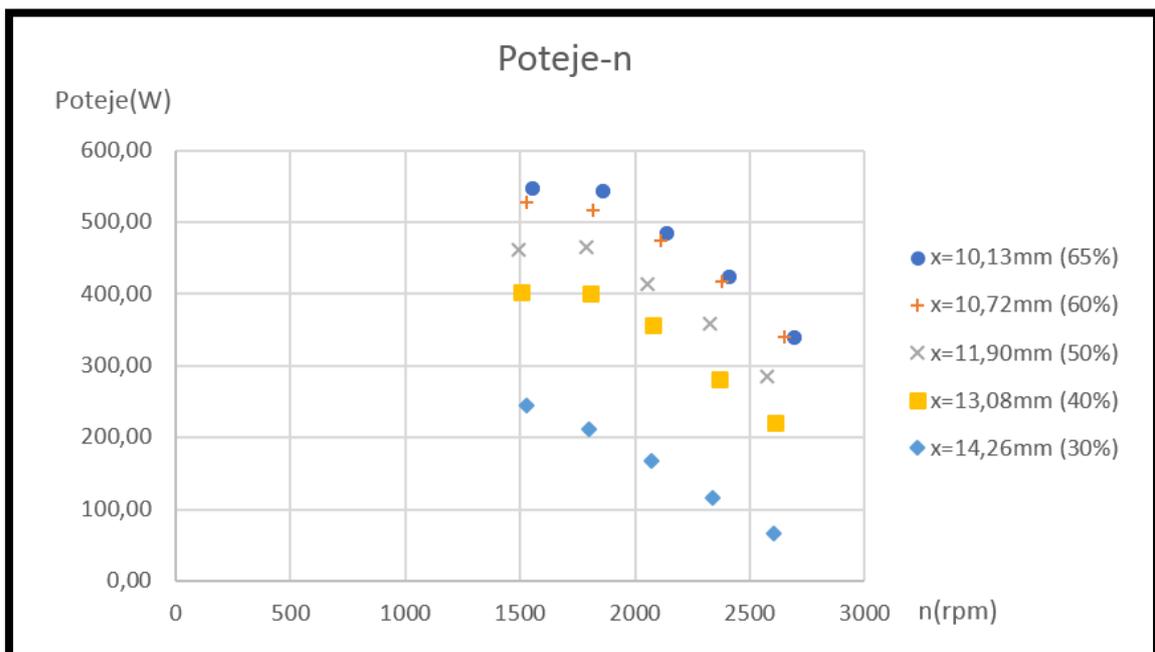
Los datos para construir la colina de rendimientos los tomaremos de los gráficos anteriores, de las intersecciones de las rectas horizontales con la curva ajustada y luego uniendo, aproximadamente, los puntos de igual rendimiento. Se tomarán preferiblemente los rendimientos: 35%, 37,5%, 40%, y el máximo alcanzado.



- Además, para la placa 3 (apertura del rodete 33,3%), se realizarán 2 gráficas más:
 - Gráfica caudal (Q) frente a velocidad de la turbina (n). Cada curva dentro de esta gráfica se corresponderá con un grado de apertura del distribuidor.



- Gráfica potencia en el eje (Peje) frente a velocidad de la turbina (n). Cada curva dentro de esta gráfica se corresponderá con un grado de apertura del distribuidor.





De la colina de rendimientos se intentará apreciar dónde está el rendimiento máximo. Para qué “caudal” (x ó Q) y para qué (n). Sería como las coordenadas de la cima de la montaña. Ese punto de máximo rendimiento se tomará como el punto de diseño de la turbina.

Con las características del punto de diseño se calcula la “velocidad específica” en función de la potencia (ns; nº de Kammerer), y la velocidad específica adimensional (ωs).

$$n_s = \frac{n(\text{rpm}) \cdot \sqrt{P_{eje}(\text{CV ó KW})}}{H_{neta}^{5/4}} \Bigg|_{\text{Punto de diseño } \mu_{\text{máx}}}$$

Hay que especificar si la potencia se ha expresado en CV ó en KW.

$$\omega_s = \frac{\omega\left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) \cdot \sqrt{\frac{P_{eje}}{\rho}}}{(g \cdot H_{neta})^{5/4}} \Bigg|_{\text{Punto de diseño } \mu_{\text{máx}}}$$

TRABAJO A REALIZAR

- Completar las tablas de valores medidos y calculados.
- Realizar las gráficas correspondientes.
- Cálculo del punto de diseño, del número específico de revoluciones y de la velocidad específica adimensional.
- Discusión de los resultados obtenidos.

Punto de diseño

Apertura del rodete: _____%

Apertura del distribuidor: _____%

n: _____rpm

x: _____mm

Hneta: 17m

ηmáx: _____%

Peje: _____W

TABLAS DE VALORES MEDIDOS Y CALCULADOS

Álabes del rodete al 16,7 % de apertura (placa 2)

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{neto} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
8,36 (80%)	0,675	-0,11	1506	49,75	2,41	8,2	1491	49,27	2,36	369,19	1104,79	33,42	0,47	
	0,65	-0,11	1797	49,9	2,2	7,9	1808	50,20	2,23	421,53		38,15	0,50	
	0,635	-0,11	2102,5	50,3	1,98	7,8	2135	51,07	2,04	456,36		41,31	0,53	
	0,625	-0,12	2407	50,3	1,765	7,7	2460	51,41	1,84	475,06		43,00	0,44	
	0,62	-0,12	2702,5	50,4	1,545	7,6	2771	51,68	1,62	471,41		42,67	0,45	
								Q _c medio 50,73						

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{neto} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
9,54 (70%)	0,665	-0,11	1511	49,45	2,39	8,0	1506	49,30	2,38	374,77	1101,96	34,01	0,47	
	0,65	-0,105	1813,5	49,8	2,19	7,9	1825	50,11	2,22	423,63		38,44	0,55	
	0,63	-0,105	2108	49,8	1,965	7,7	2149	50,77	2,04	459,52		41,70	0,57	
	0,615	-0,12	2409,5	50,2	1,81	7,6	2480	51,66	1,92	497,79		45,17	0,45	
	0,625	-0,115	2708	50,05	1,52	7,7	2769	51,17	1,59	460,74		41,81	0,48	
								Q _c medio 50,60						



Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
10,72 (60%)	0,655	-0,105	1510,5	46,5	2,215	7,9	1521	46,83	2,25	357,85	1023,12	34,98	0,44	
	0,645	-0,095	1808	46,7	2,005	7,8	1832	47,33	2,06	395,07		38,61	0,56	
	0,64	-0,085	2106,5	46,6	1,78	7,7	2142	47,39	1,84	412,85		40,35	0,66	
	0,655	-0,065	2402	46,7	1,56	7,9	2418	47,02	1,58	400,48		39,14	0,85	
	0,665	-0,065	2697,5	46,3	1,345	8,0	2700	46,34	1,35	380,91		37,23	0,83	
								Q _c medio						
								46,98						

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
11,90 (50%)	0,66	-0,1	1508,5	48,45	2,26	8,0	1511	48,52	2,27	358,54	1049,25	34,17	0,54	
	0,625	-0,115	1800	47,35	2,11	7,6	1847	48,59	2,22	429,67		40,95	0,39	
	0,625	-0,115	2105	47,4	1,895	7,6	2160	48,63	1,99	451,19		43,00	0,40	
	0,64	-0,08	2396,5	47,3	1,605	7,8	2435	48,06	1,66	422,40		40,26	0,73	
	0,66	-0,07	2702	46,95	1,36	7,9	2711	47,10	1,37	388,62		37,04	0,80	
								Q _c medio						
								48,18						

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
13,08 (40%)	0,665	-0,1	1514,5	43,8	2,03	7,9	1520	43,97	2,05	325,61	942,32	34,55	0,40	
	0,665	-0,08	1799	43,8	1,885	7,9	1806	43,97	1,90	359,15		38,11	0,60	
	0,675	-0,05	2111	43,6	1,6	8,0	2106	43,50	1,59	351,16		37,27	0,90	
	0,695	-0,03	2393,5	43,35	1,385	8,2	2359	42,72	1,34	332,21		35,25	1,08	
	0,705	-0,02	2708,5	43,1	1,18	8,3	2653	42,22	1,13	314,67		33,39	1,17	
								Q _c medio						
								42,72						



Álabes del rodete al 33,3 % de apertura (placa 3)

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{neto} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
10,72 (60%)	0,675	-0,15	1503	52,1	2,895	8,2	1484	51,44	2,82	438,63	1126,35	38,94	0,13	
	0,655	-0,125	1803,5	52,3	2,545	8,0	1803	52,28	2,54	480,12		42,63	0,42	
	0,675	-0,08	2105,5	52,25	2,105	8,2	2079	51,58	2,05	446,52		39,64	0,85	
	0,68	-0,06	2401	52,05	1,745	8,3	2364	51,24	1,69	418,53		37,16	1,05	
	0,7	-0,035	2697	53,65	1,41	8,5	2617	52,07	1,33	363,96		32,31	1,33	
								Q _c medio 51,72						

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{neto} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
11,90 (50%)	0,675	-0,145	1501	53	2,965	8,2	1480	52,27	2,88	447,05	1145,51	39,03	0,22	
	0,645	-0,13	1806,5	53,3	2,61	7,9	1815	53,55	2,63	500,72		43,71	0,41	
	0,66	-0,085	2098,5	53,2	2,17	8,1	2089	52,95	2,15	470,11		41,04	0,85	
	0,67	-0,07	2398,5	53	1,8	8,2	2373	52,43	1,76	437,74		38,21	0,99	
	0,685	-0,05	2698	52,85	1,47	8,3	2645	51,81	1,41	391,32		34,16	1,17	
								Q _c medio 52,60						



Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m									
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
12,49 (45%)	0,655	-0,145	1503	50,05	2,79	8,0	1507	50,18	2,80	442,56	972,60	45,50	0,14		
	0,655	-0,125	1655,5	50,1	2,6	8,0	1660	50,23	2,61	454,18		46,70	0,35		
	0,655	-0,095	1950,5	51,3	2,22	8,0	1952	51,35	2,22	454,76		46,76	0,69		
	0,665	-0,065	2253	51,2	1,82	8,1	2241	50,93	1,80	422,68		43,46	0,98		
	0,685	-0,035	2545	51,05	1,515	8,3	2501	50,16	1,46	383,08		39,39	1,26		
								Q _c medio 50,57							

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m									
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
13,08 (40%)	0,66	-0,115	1505,5	48,85	2,56	8,0	1507	48,90	2,56	404,72	1047,51	38,64	0,40		
	0,665	-0,07	1809	48,95	2,195	8,0	1805	48,83	2,18	412,85		39,41	0,86		
	0,68	-0,05	2102	48,75	1,835	8,2	2078	48,19	1,79	390,14		37,24	1,04		
	0,69	-0,02	2406	48,35	1,485	8,3	2365	47,52	1,43	355,25		33,91	1,33		
	0,72	0	2702,5	48,8	1,16	8,6	2607	47,08	1,08	294,72		28,14	1,52		
								Q _c medio 48,10							

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m									
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
14,26 (30%)	0,66	0,005	1507	37,4	1,37	7,8	1528	37,92	1,41	225,34	791,40	28,47	1,30		
	0,685	0,03	1805,5	37,2	1,09	8,0	1802	37,12	1,09	204,77		25,87	1,54		
	0,705	0,045	2102,5	36,8	0,87	8,2	2073	36,28	0,85	183,50		23,19	1,67		
	0,73	0,055	2404,5	36,6	0,655	8,5	2335	35,54	0,62	151,01		19,08	1,75		
	0,745	0,085	2705	36,25	0,43	8,6	2604	34,90	0,40	108,67		13,73	2,04		
								Q _c medio 36,34							



Álabes del rodete al 50 % de apertura (placa 4)

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m										
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
10,13 (65%)	0,6	-0,18	1504,5	57,15	3,185	7,6	1548	58,81	3,37	546,91	1253,75	43,62	0,11			
	0,6	-0,125	1805	57,05	2,64	7,6	1858	58,72	2,80	544,13		43,40	0,66			
	0,62	-0,08	2099,5	56,7	2,1	7,7	2133	57,62	2,17	484,47		38,64	1,08			
	0,635	-0,07	2394	56,5	1,66	7,9	2410	56,87	1,68	424,43		33,85	1,15			
	0,655	-0,02	2704	56,2	1,225	8,1	2688	55,88	1,21	340,92		27,19	1,62			
								Q _c medio						57,57		

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m										
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
10,72 (60%)	0,62	-0,17	1503	56,75	3,2	7,7	1527	57,66	3,30	528,38	1226,96	43,06	0,16			
	0,63	-0,115	1800	56,7	2,665	7,8	1817	57,24	2,72	516,87		42,13	0,71			
	0,64	-0,09	2105,5	56,3	2,13	7,9	2113	56,50	2,15	474,78		38,70	0,93			
	0,66	-0,06	2402	56,15	1,705	8,1	2381	55,66	1,68	417,64		34,04	1,21			
	0,68	-0,01	2706,5	55,85	1,275	8,3	2651	54,70	1,22	339,50		27,67	1,68			
								Q _c medio						56,34		



Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	Pman _e (bar)	Pman _{asp} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	H _{pasp} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
11,90 (50%)	0,66	-0,13	1500,5	53,9	2,985	8,1	1492	53,59	2,95	461,08	1138,54	40,50	0,42	
	0,66	-0,085	1796,5	53,75	2,51	8,1	1787	53,46	2,48	464,47		40,80	0,87	
	0,685	-0,045	2100	53,65	2	8,3	2057	52,54	1,92	413,10		36,28	1,25	
	0,705	0	2404	53,15	1,565	8,5	2328	51,46	1,47	357,56		31,40	1,67	
	0,73	0,02	2699	52,85	1,16	8,8	2576	50,44	1,06	285,01		25,03	1,83	
								Q _c medio						
								52,28						

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	Pman _e (bar)	Pman _{asp} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	H _{pasp} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
13,08 (40%)	0,665	-0,085	1504,5	50,4	2,59	8,1	1498	50,19	2,57	402,92	1056,22	38,15	0,75	
	0,675	-0,055	1802,5	50,3	2,19	8,2	1784	49,78	2,15	400,71		37,94	1,05	
	0,695	-0,015	2100	50	1,73	8,4	2054	48,89	1,65	355,78		33,68	1,42	
	0,735	0,03	2402,5	49,35	1,285	8,8	2296	47,16	1,17	282,12		26,71	1,83	
	0,755	0,055	2698,5	49,3	0,925	9,0	2549	46,57	0,83	220,39		20,87	2,06	
								Q _c medio						
								48,50						

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	Pman _e (bar)	Pman _{asp} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net} (W)	η _{total} (%)	H _{pasp} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
14,26 (30%)	0,66	-0,01	1509	38,5	1,49	7,8	1528	38,99	1,53	244,60	800,33	30,56	1,18	
	0,685	0,055	1812,5	38,1	1,12	8,0	1807	37,99	1,11	210,68		26,32	1,81	
	0,725	0,08	2108	37,75	0,82	8,5	2051	36,73	0,78	166,72		20,83	2,04	
	0,755	0,1	2401	37,15	0,525	8,7	2296	35,53	0,48	115,44		14,42	2,21	
	0,79	0,135	2702	37	0,285	9,1	2533	34,69	0,25	66,44		8,30	2,55	
								Q _c medio						
								36,75						



Álabes del rodete al 66,7 % de apertura (placa 5)

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m										
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{neto} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
10,72 (60%)	0,62	-0,15	1502,5	56,95	3,165	7,8	1526	57,85	3,27	521,96	1208,01	43,21	0,37			
	0,64	-0,09	1804,5	56,45	2,56	7,9	1811	56,64	2,58	488,73		40,46	0,94			
	0,66	-0,045	2108	56,05	1,995	8,1	2090	55,56	1,96	429,05		35,52	1,36			
	0,69	0,005	2409,5	55,8	1,495	8,4	2346	54,32	1,42	348,06		28,81	1,82			
	0,72	0,04	2696	55,5	1,025	8,7	2579	53,10	0,94	253,42		20,98	2,13			
								Q _c medio						55,47		

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m										
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{neto} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
11,31 (55%)	0,66	-0,12	1500,5	55,15	3,06	8,1	1489	54,74	3,01	470,22	1145,08	41,06	0,56			
	0,675	-0,075	1803,5	54,95	2,51	8,3	1774	54,05	2,43	451,15		39,40	0,99			
	0,71	-0,015	2107	54,55	1,945	8,6	2030	52,56	1,81	383,93		33,53	1,55			
	0,73	0,03	2409,5	54,1	1,465	8,8	2296	51,55	1,33	319,83		27,93	1,98			
	0,765	0,07	2702	53,65	1,01	9,2	2525	50,14	0,88	233,34		20,38	2,33			
								Q _c medio						52,58		



Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
11,90 (50%)	0,65	-0,145	1504	56,25	3,175	8,0	1500	56,10	3,16	496,05	1169,47	42,42	0,36	
	0,67	-0,085	1800,5	56	2,605	8,2	1774	55,17	2,53	469,75		40,17	0,93	
	0,71	-0,035	2103,5	55,5	2,035	8,6	2024	53,41	1,88	399,53		34,16	1,38	
	0,73	0,02	2404,5	55,25	1,55	8,8	2288	52,57	1,40	336,21		28,75	1,91	
	0,755	0,055	2703,5	54,75	1,06	9,1	2538	51,39	0,93	248,17		21,22	2,22	
								Q _c medio						
								53,70						

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
13,08 (40%)	0,655	-0,07	1500	51,35	2,595	8,0	1501	51,40	2,60	408,72	1064,28	38,40	0,95	
	0,67	-0,04	1807	51,135	2,14	8,1	1792	50,71	2,10	394,97		37,11	1,23	
	0,715	0,02	2101	50,3	1,62	8,6	2029	48,58	1,51	321,13		30,17	1,77	
	0,745	0,085	2402,5	50	1,22	8,9	2281	47,47	1,10	262,64		24,68	2,40	
	0,775	0,1	2699	49,65	0,8	9,2	2520	46,36	0,70	184,10		17,30	2,52	
								Q _c medio						
								48,87						

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
14,26 (30%)	0,66	0,02	1508	39,5	1,58	7,8	1526	39,96	1,62	258,40	805,56	32,08	1,51	
	0,705	0,06	1816,5	38,9	1,195	8,3	1787	38,27	1,16	216,48		26,87	1,87	
	0,75	0,08	2096	38,25	0,875	8,7	2008	36,65	0,80	168,95		20,97	2,04	
	0,785	0,115	2403,5	37,9	0,56	9,1	2258	35,60	0,49	116,85		14,50	2,37	
	0,815	0,14	2706	37,55	0,225	9,4	2501	34,70	0,19	50,33		6,25	2,60	
								Q _c medio						
								36,99						



Álabes del rodete al 83,3% de apertura (placa 6)

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m										
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
10,72 (60%)	0,59	-0,13	1499,5	57	3,005	7,4	1554	59,07	3,23	525,26	1219,56	43,07	0,63			
	0,625	-0,08	1804	56,45	2,43	7,8	1828	57,20	2,49	477,52		39,15	1,06			
	0,645	-0,03	2100	56,05	1,88	8,0	2102	56,09	1,88	414,42		33,98	1,53			
	0,67	0,025	2404	55,6	1,37	8,2	2370	54,81	1,33	330,41		27,09	2,04			
	0,71	0,06	2705	55,05	0,895	8,6	2605	53,01	0,83	226,36		18,56	2,33			
								Q _c medio						56,00		

Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m										
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m ³ /h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m ³ /h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
11,31 (55%)	0,62	-0,135	1500,5	56,7	3,085	7,7	1525	57,62	3,19	508,66	1188,20	42,81	0,52			
	0,645	-0,07	1801	56,15	2,475	8,0	1802	56,19	2,48	467,69		39,36	1,13			
	0,68	-0,015	2094,5	55,75	1,94	8,3	2052	54,61	1,86	399,93		33,66	1,63			
	0,715	0,03	2398,5	55,15	1,42	8,7	2302	52,94	1,31	315,52		26,55	2,03			
	0,745	0,07	2700	54,7	0,95	9,0	2549	51,64	0,85	225,97		19,02	2,39			
								Q _c medio						54,56		



Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
11,90 (50%)	0,63	-0,095	1499,5	54,2	2,86	7,8	1519	54,92	2,94	467,17	1124,39	41,55	0,82	
	0,66	-0,045	1801,5	53,7	2,32	8,1	1792	53,41	2,29	430,60		38,30	1,28	
	0,71	0,015	2104	53,05	1,78	8,6	2031	51,22	1,66	352,89		31,39	1,81	
	0,735	0,07	2405	52,7	1,265	8,8	2289	50,16	1,15	274,70		24,43	2,34	
	0,765	0,095	2703	52	0,83	9,1	2531	48,70	0,73	192,96		17,16	2,54	
								Q _c medio						
								51,63						

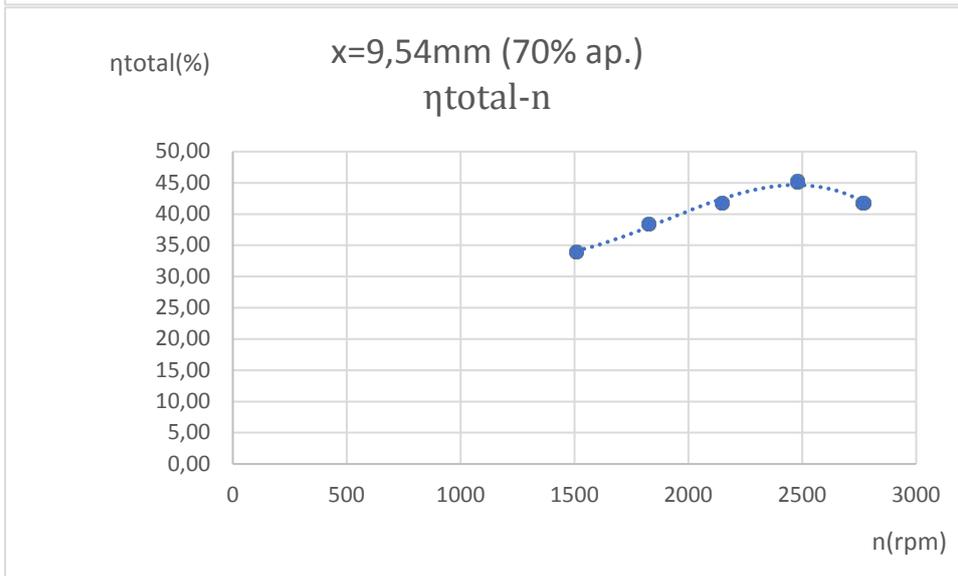
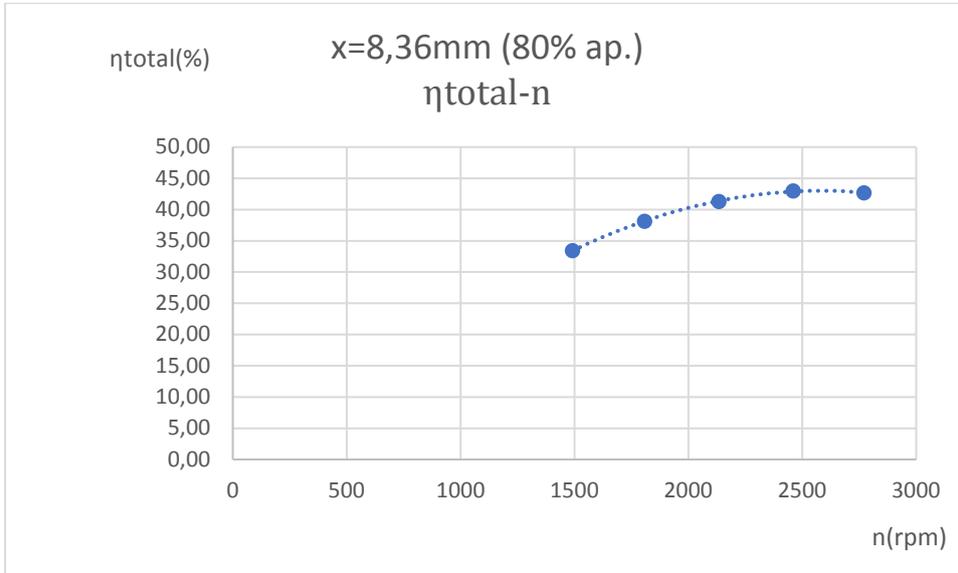
Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
12,49 (45%)	0,645	-0,09	1502,5	53,95	2,87	7,9	1508	54,15	2,89	456,71	1110,01	41,14	0,84	
	0,675	-0,045	1805,5	53,45	2,32	8,2	1780	52,68	2,25	420,01		37,84	1,25	
	0,725	0,02	2104	52,8	1,775	8,7	2014	50,54	1,63	343,02		30,90	1,84	
	0,75	0,075	2405	52,2	1,275	9,0	2271	49,29	1,14	270,32		24,35	2,36	
	0,78	0,095	2699,5	52,15	0,85	9,3	2507	48,42	0,73	192,39		17,33	2,53	
								Q _c medio						
								50,97						

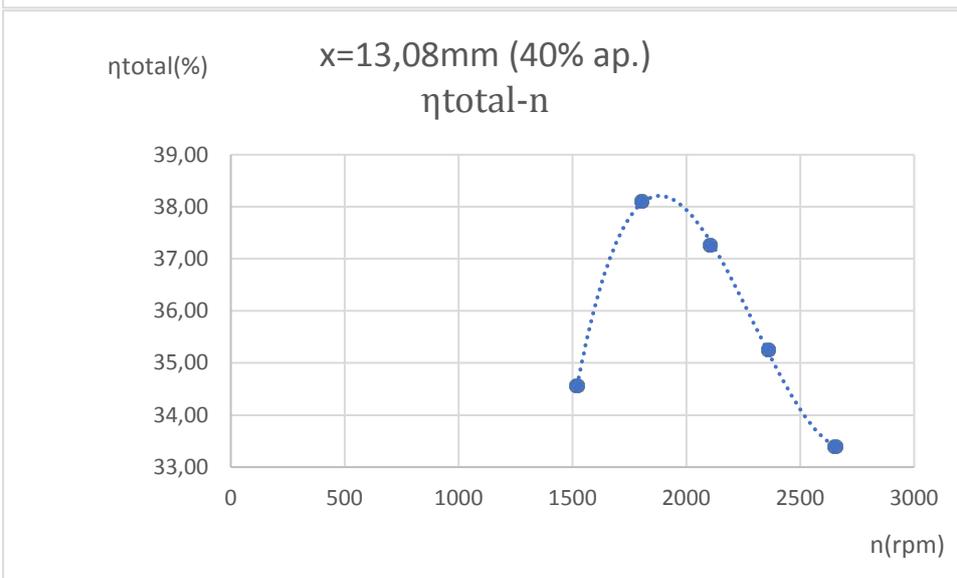
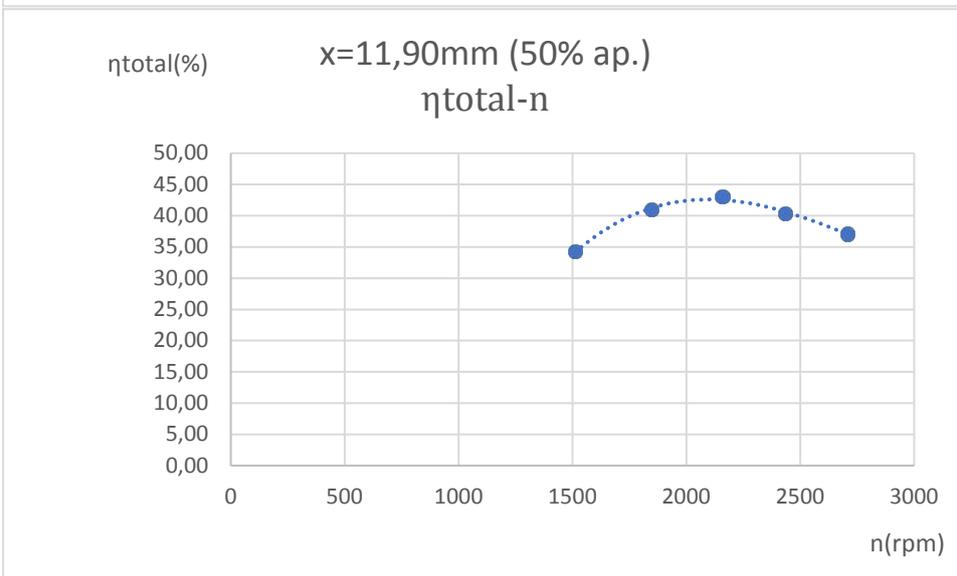
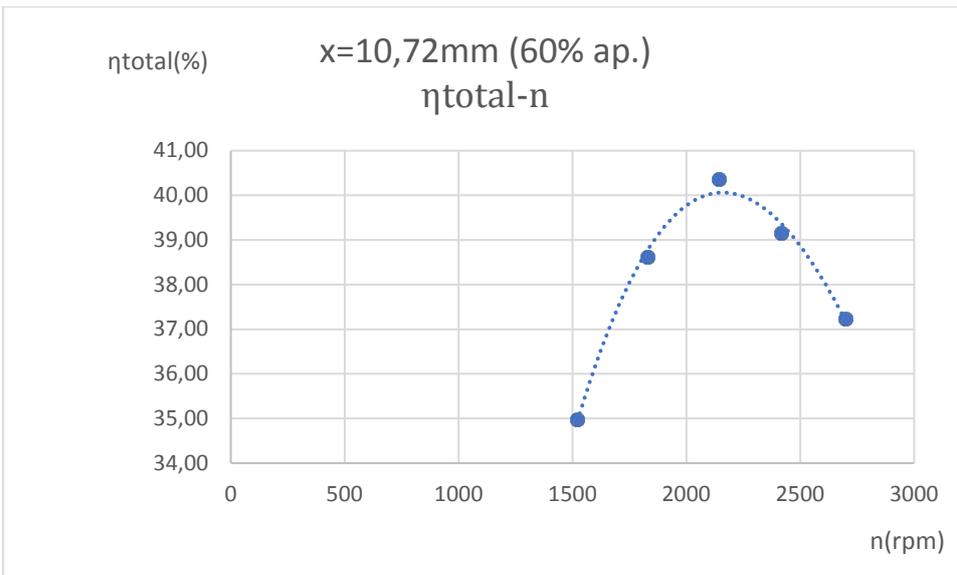
Valores medidos, experimentales						Experiment. corregidos Puntos homólogos a H=8m								
X	P _{man_e} (bar)	P _{man_{asp}} (bar)	n (rpm)	Q (m3/h)	M (nxm)	H (m)	n _c (rpm)	Q _c (m3/h)	M _c (nxm)	Pot _{eje} (W)	Pot _{net_a} (W)	η _{total} (%)	H _{p_{asp}} (m)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
13,08 (40%)	0,655	-0,06	1506,5	51,1	2,58	8,0	1508	51,16	2,59	408,52	1042,94	39,17	1,04	
	0,685	-0,02	1804,5	50,5	2,095	8,3	1774	49,66	2,03	376,39		36,09	1,40	
	0,735	0,055	2101,5	49,7	1,575	8,8	2007	47,47	1,44	302,10		28,97	2,09	
	0,77	0,11	2400,5	49,45	1,11	9,1	2248	46,31	0,97	229,25		21,98	2,62	
	0,8	0,12	2700	48,9	0,715	9,4	2489	45,08	0,61	158,35		15,18	2,68	
								Q _c medio						
								47,89						

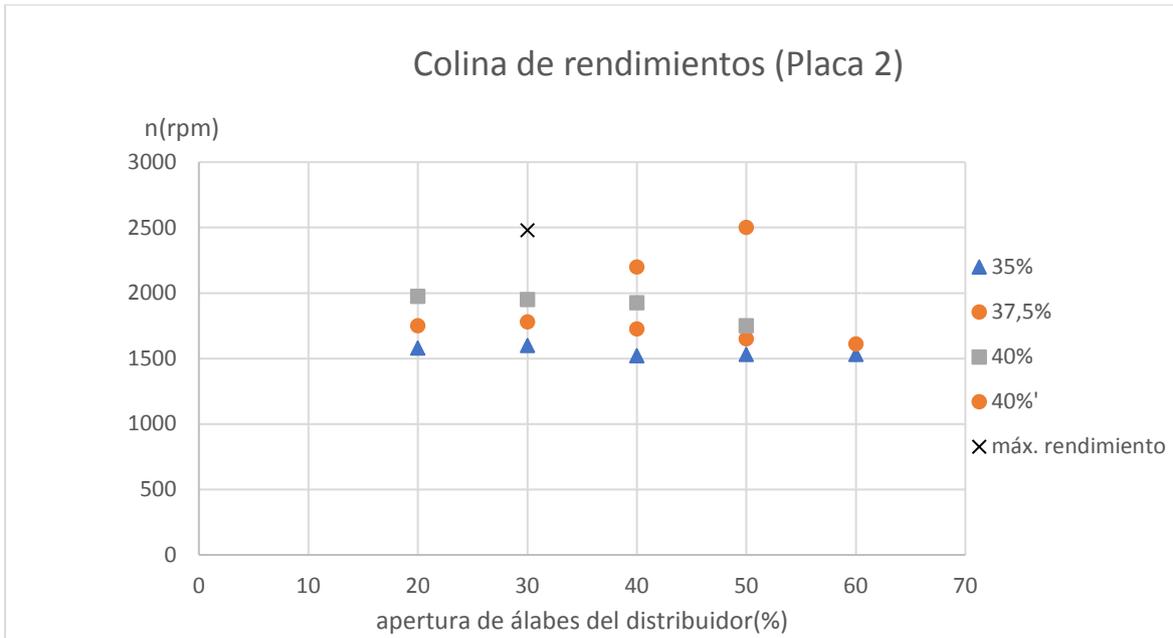


GRÁFICAS OBTENIDAS EN LA PRÁCTICA

Placa 2 (apertura del rodete 16,7%)

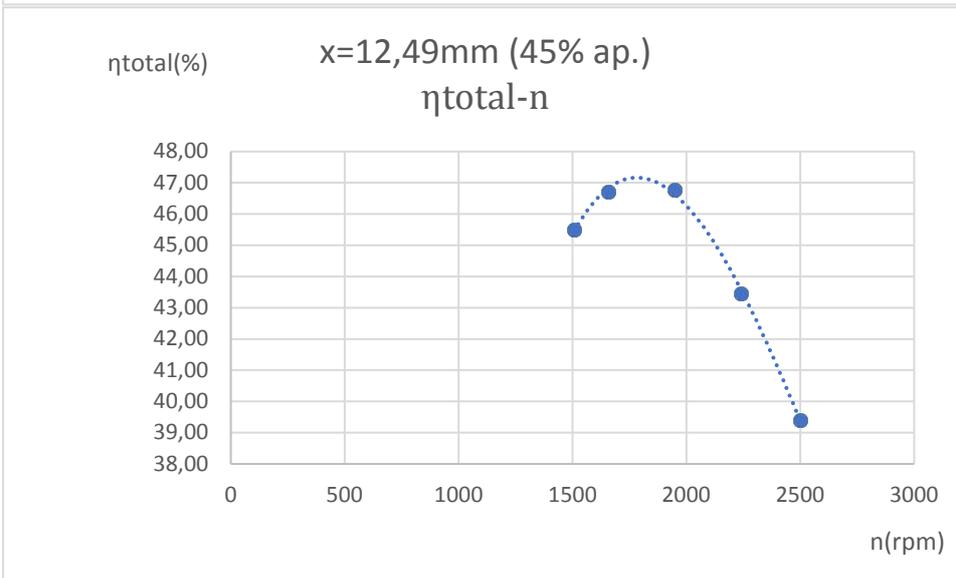
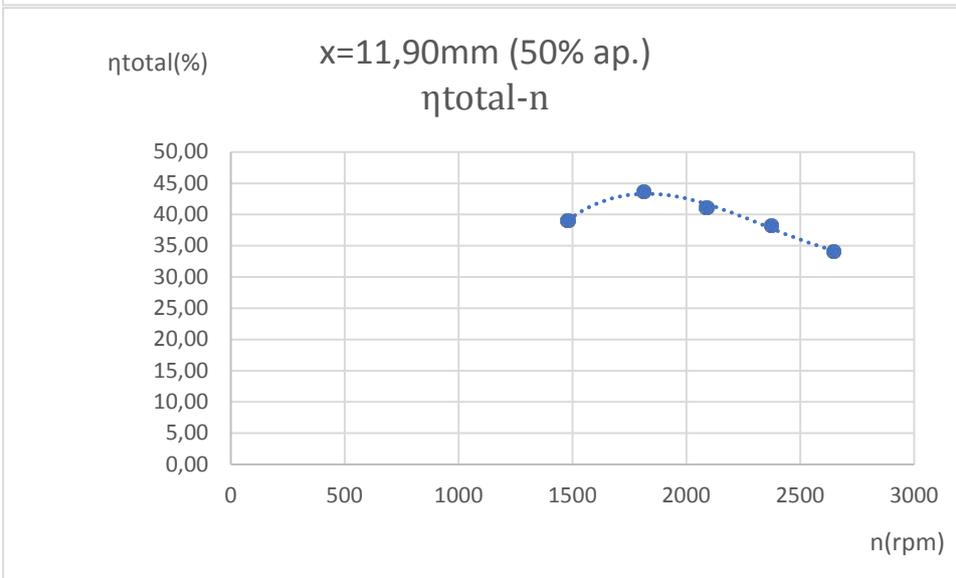
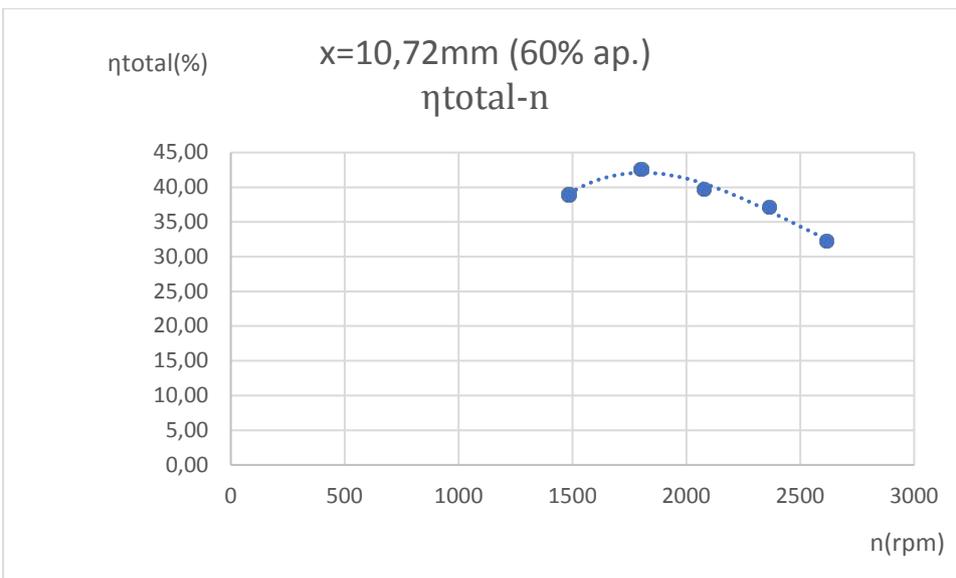


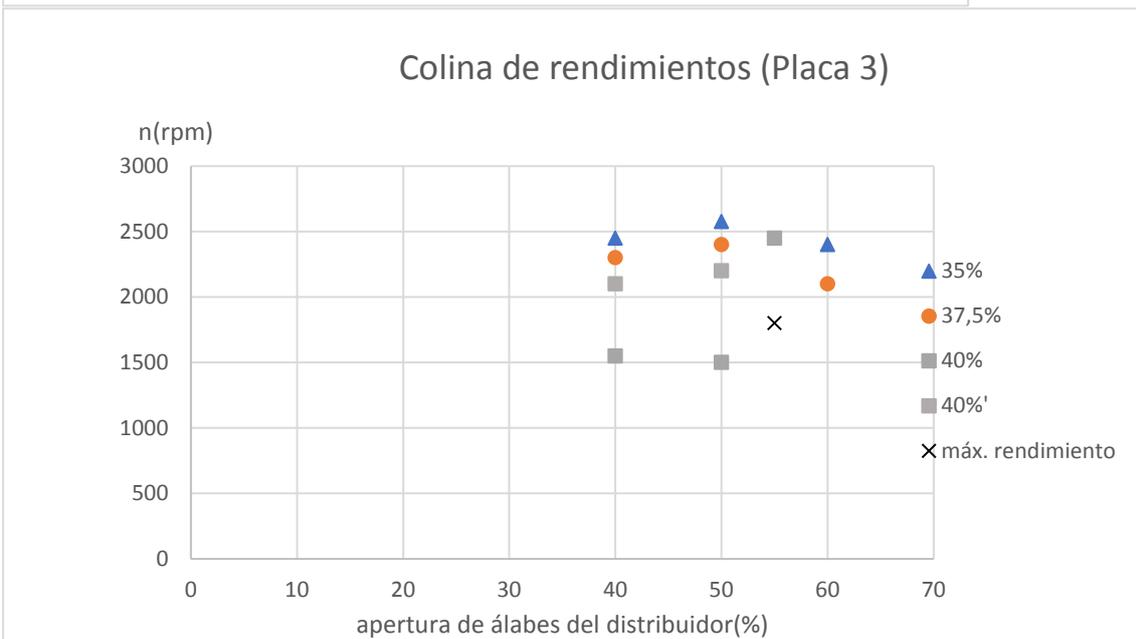
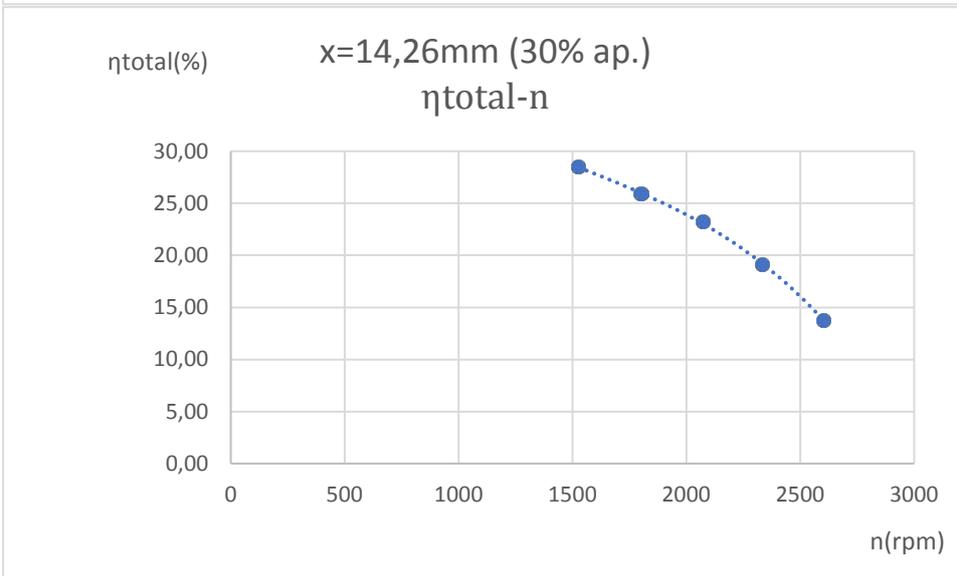
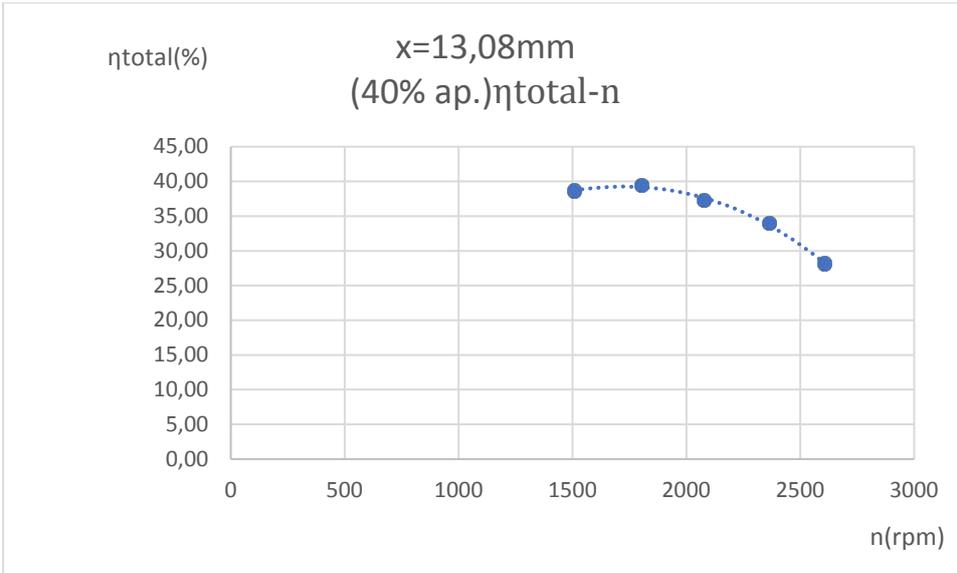


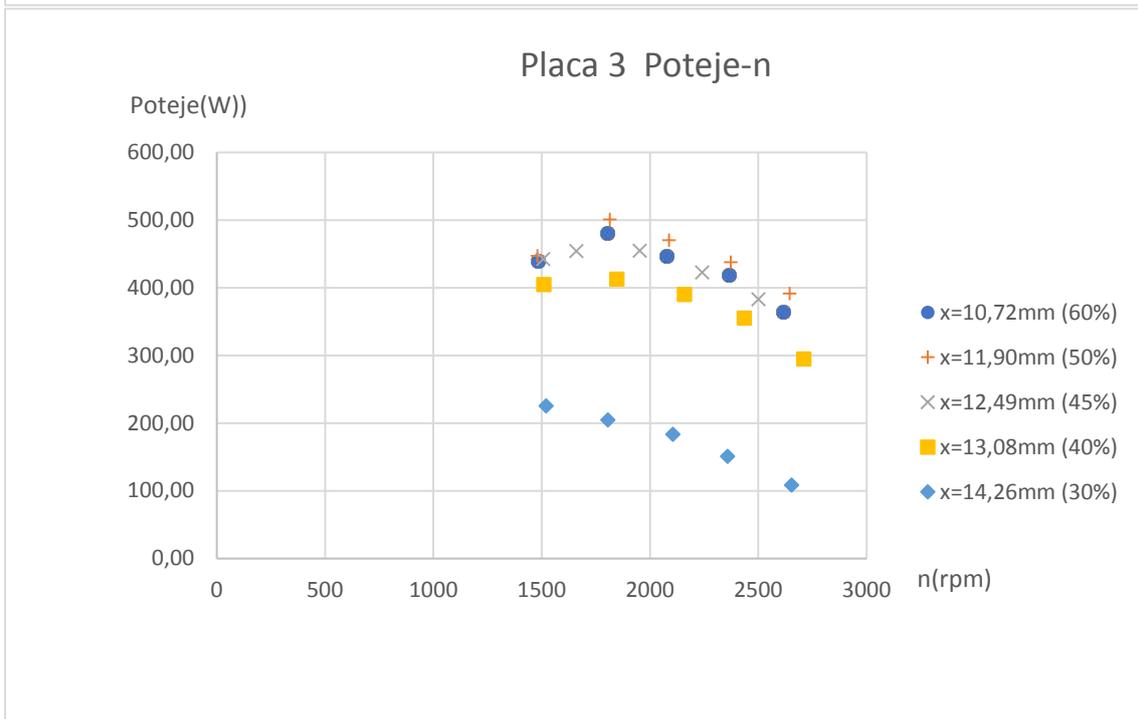
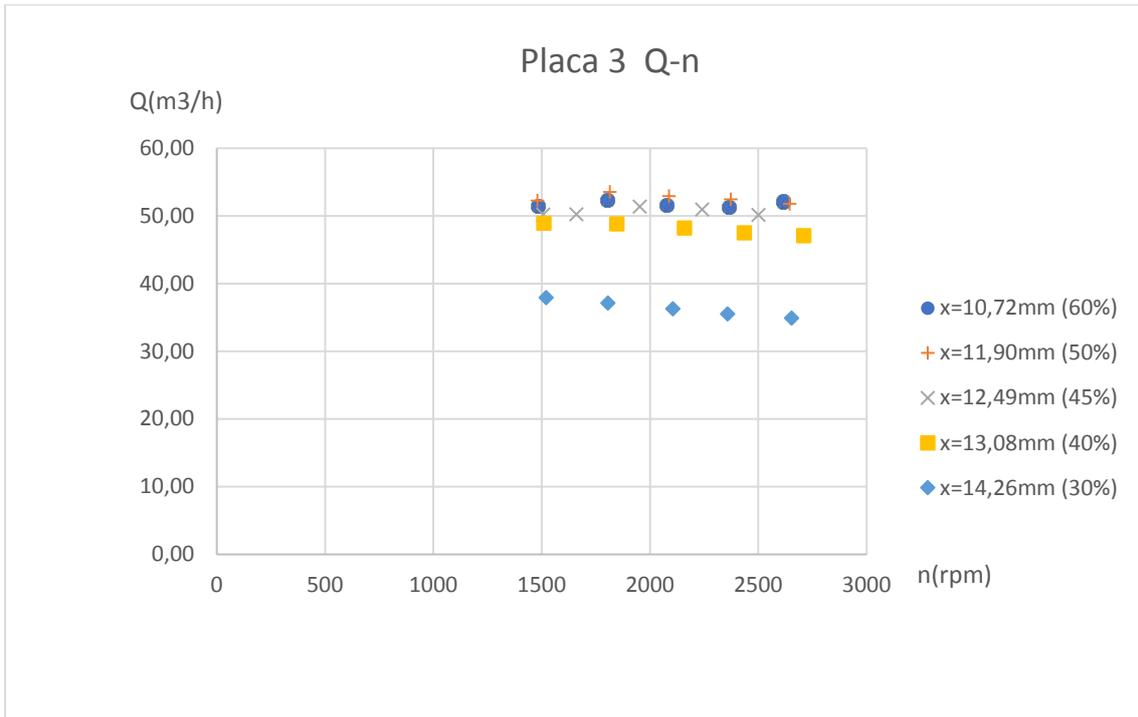




Placa 3 (apertura del rodete 33,3%)

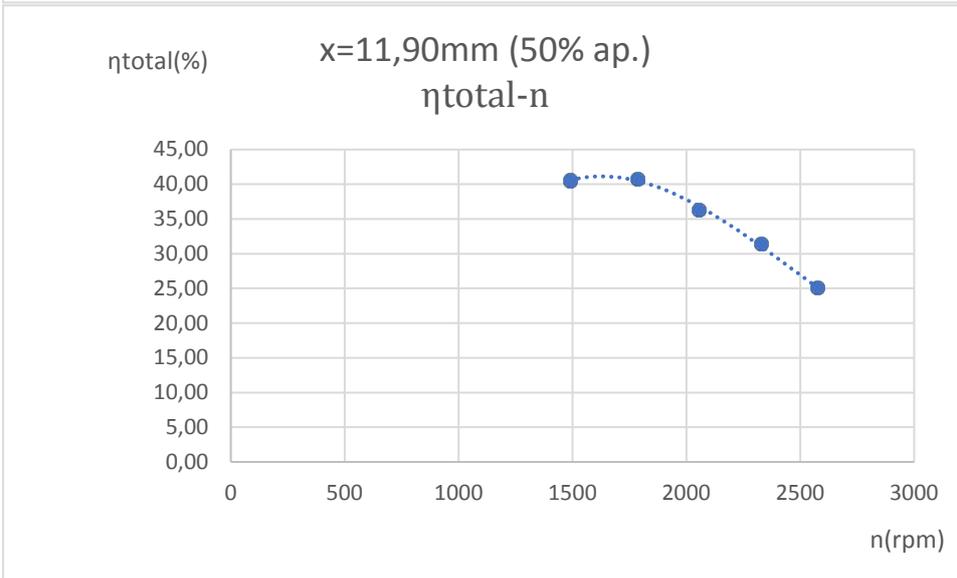
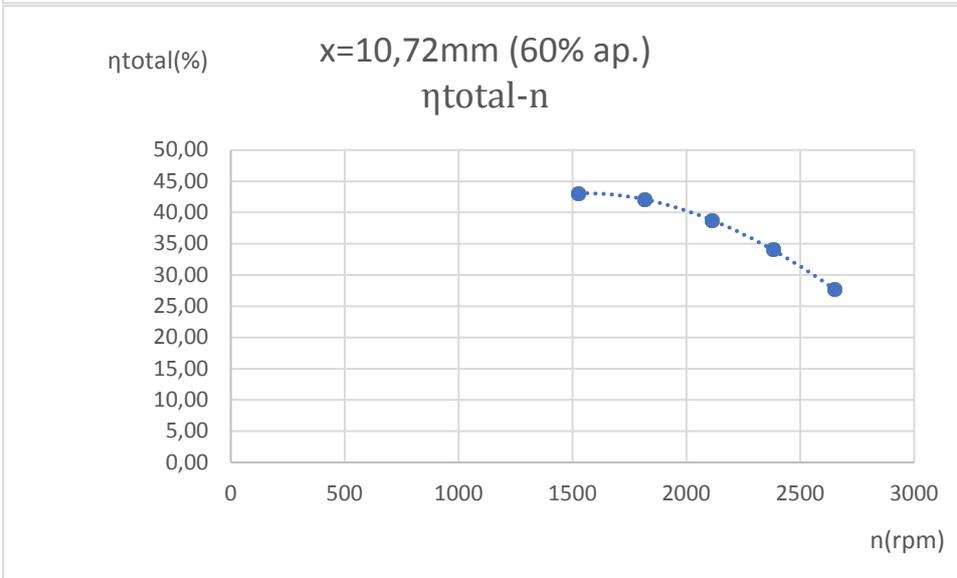
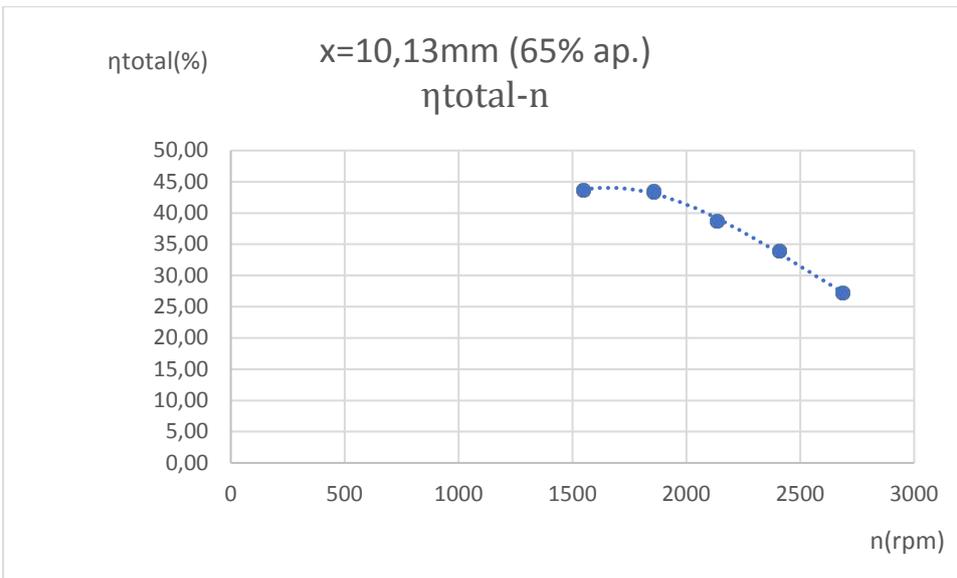


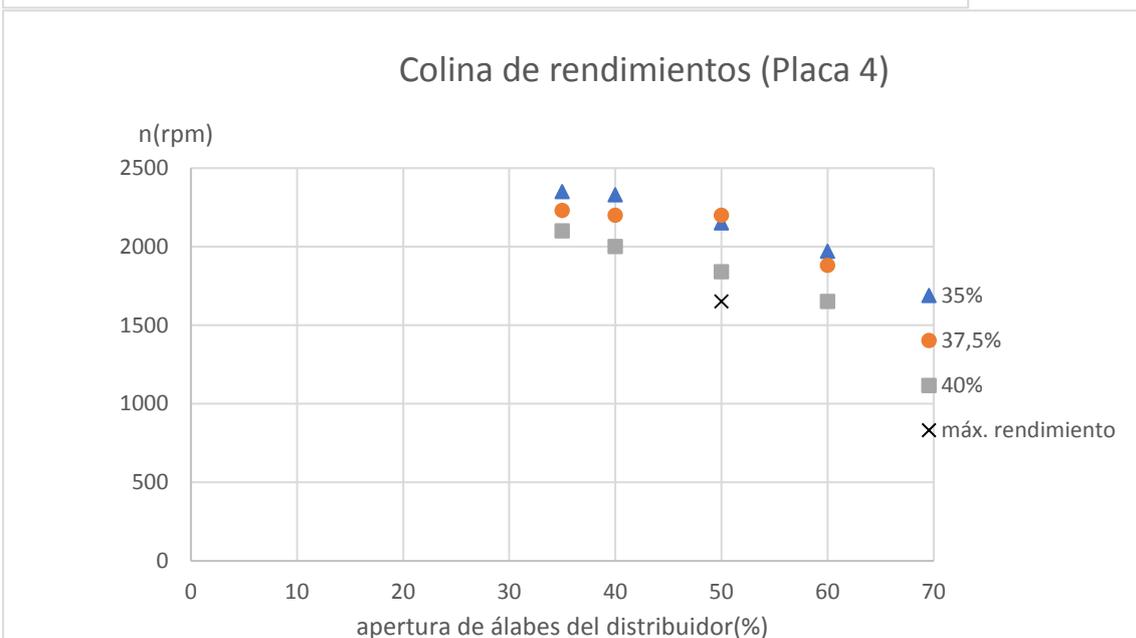
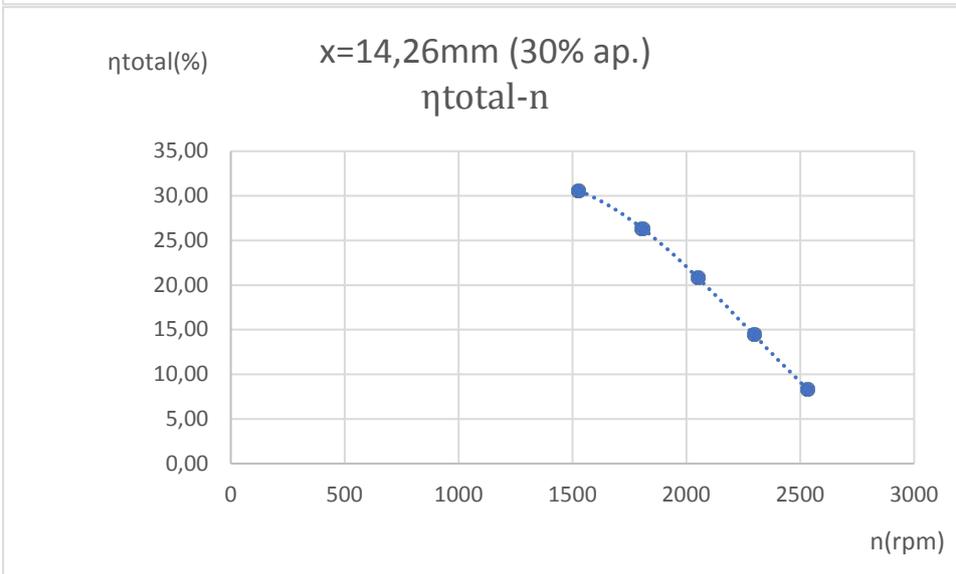
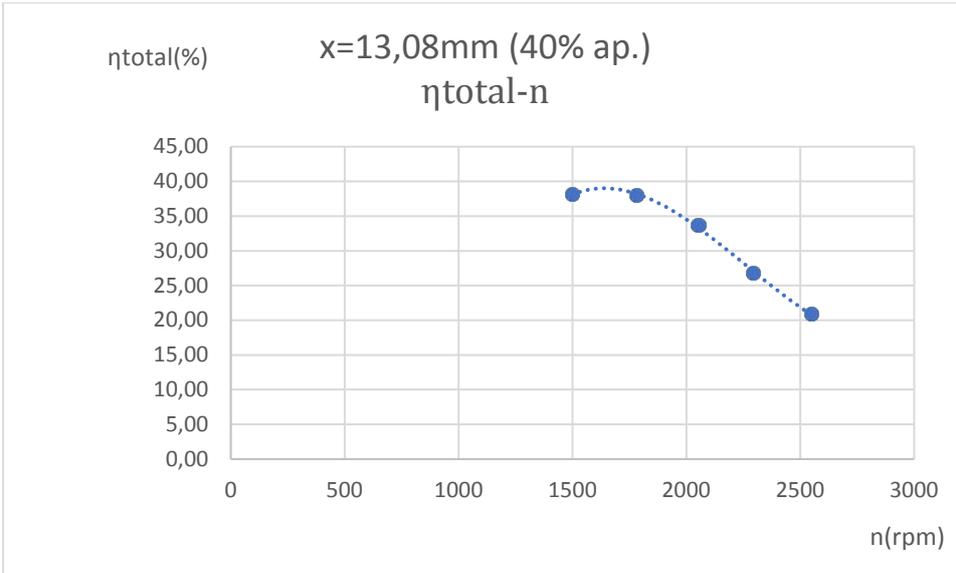






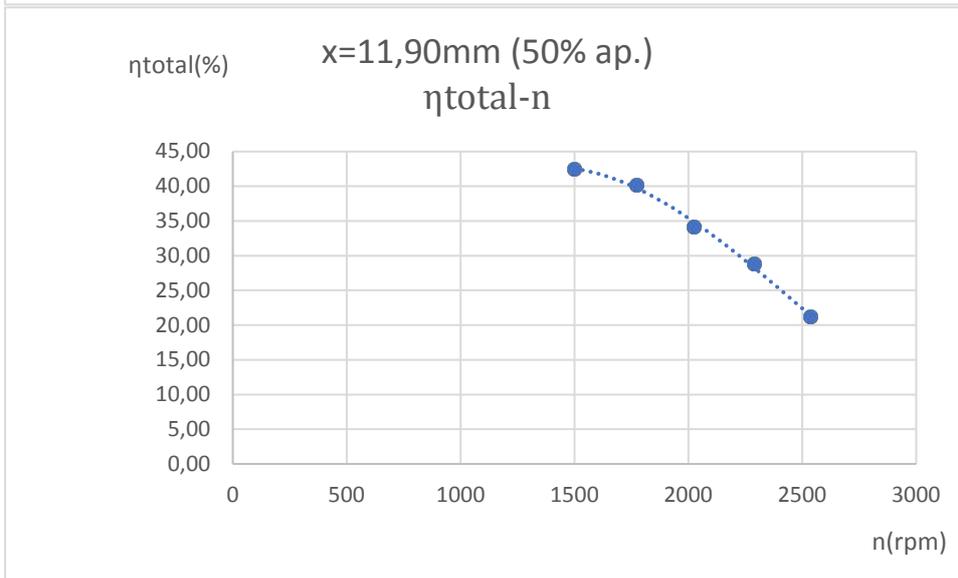
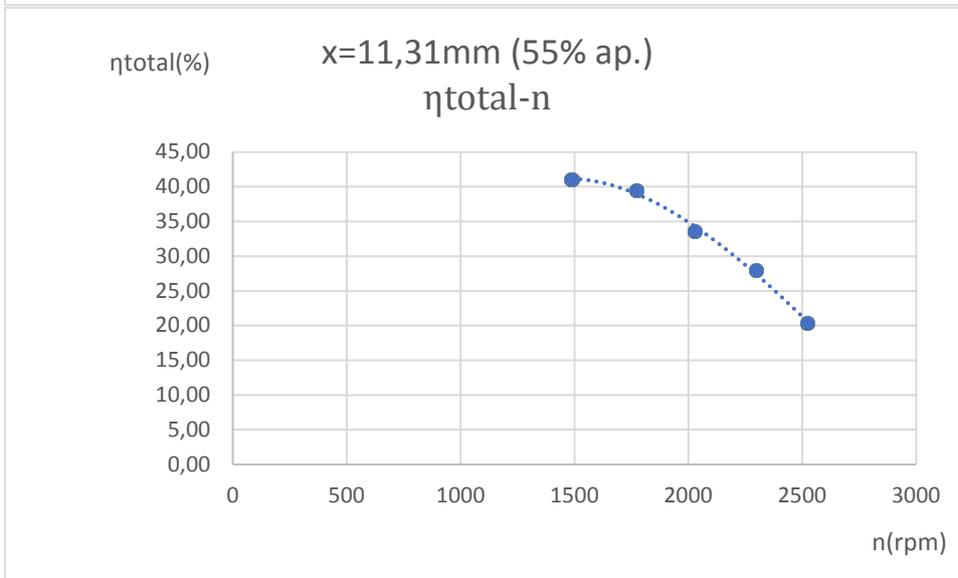
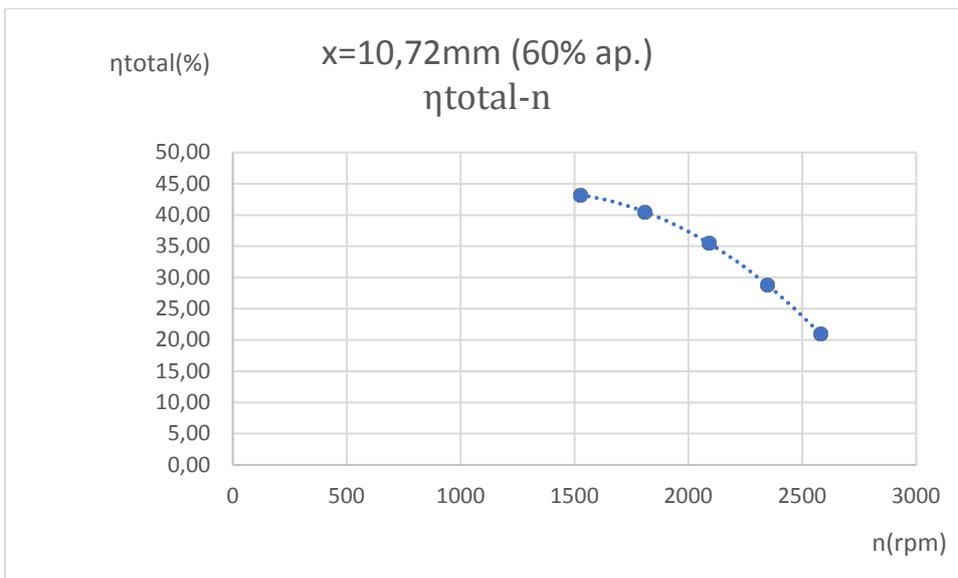
Placa 4 (apertura del rodete 50%)

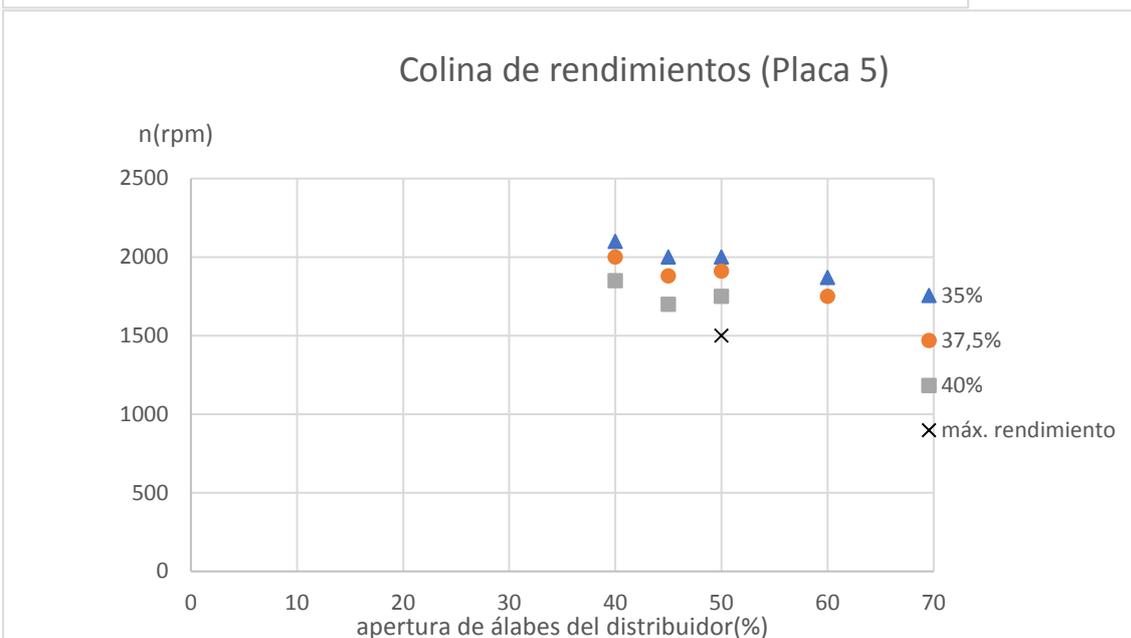
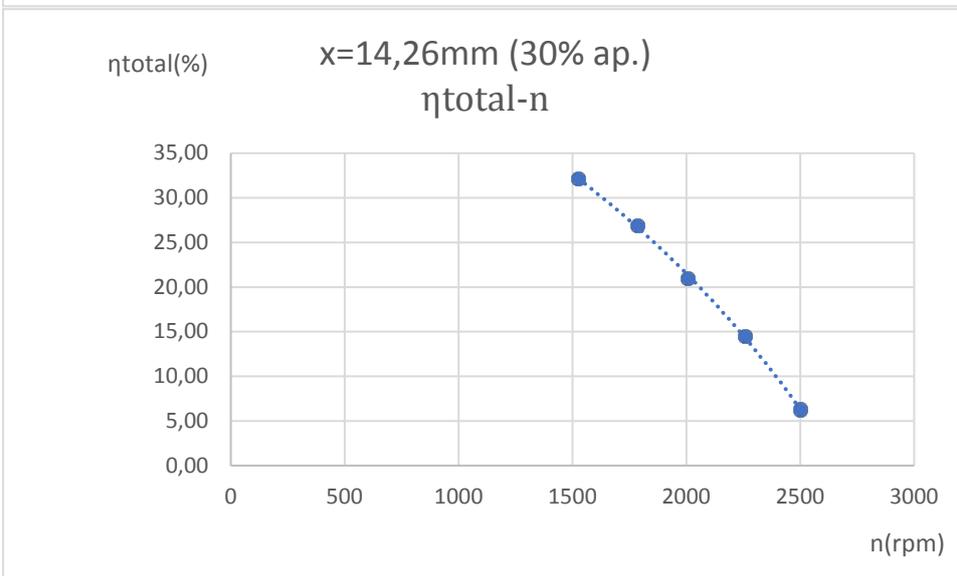
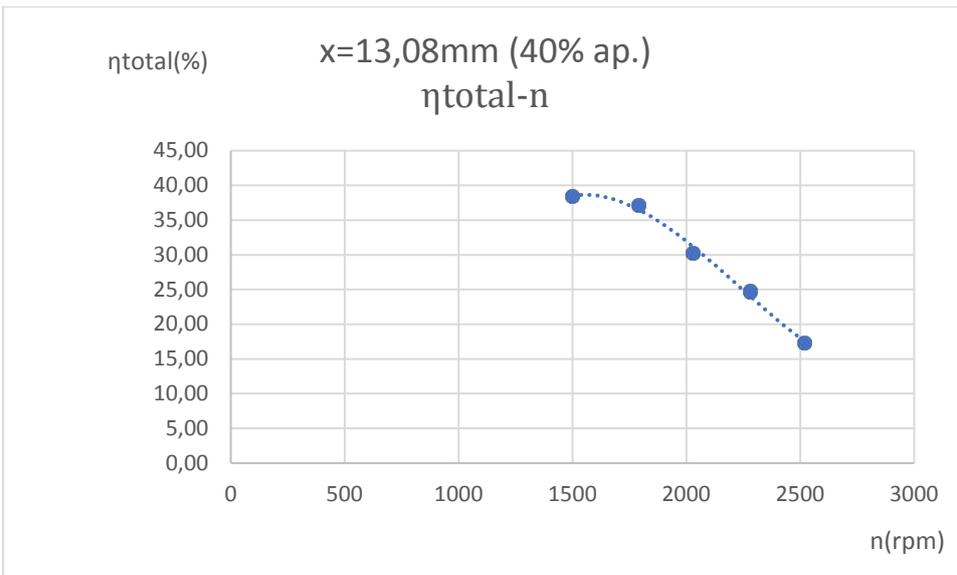






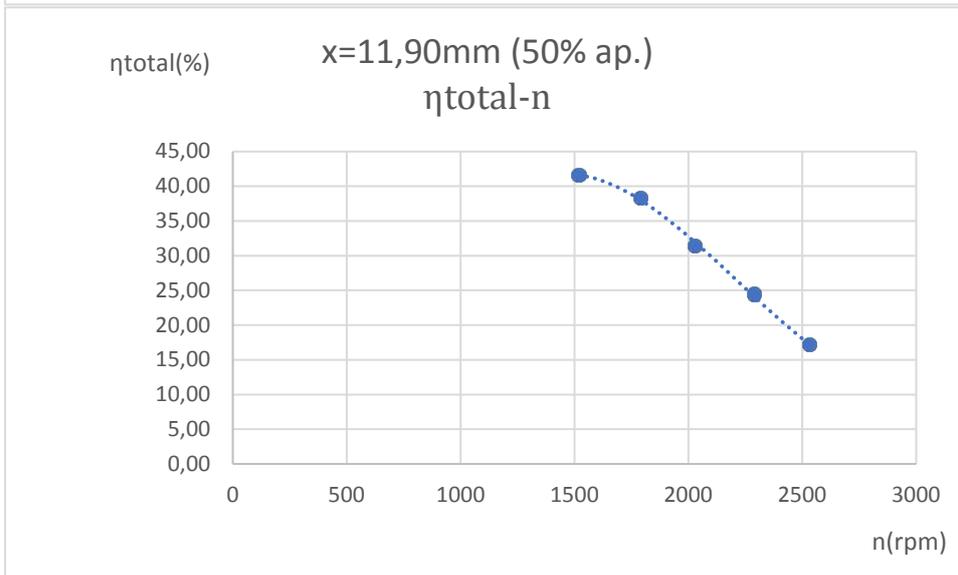
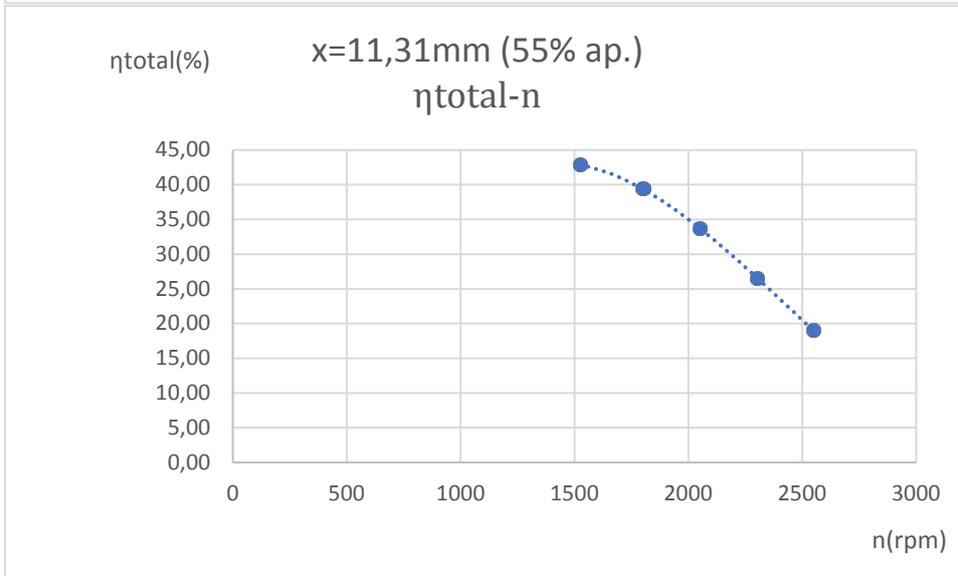
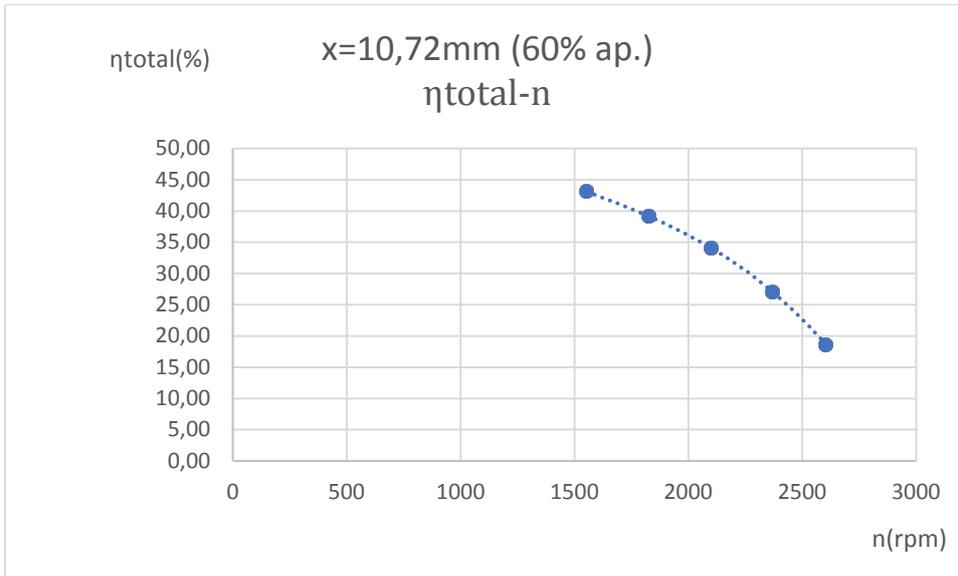
Placa 5 (apertura del rodete 66,7%)

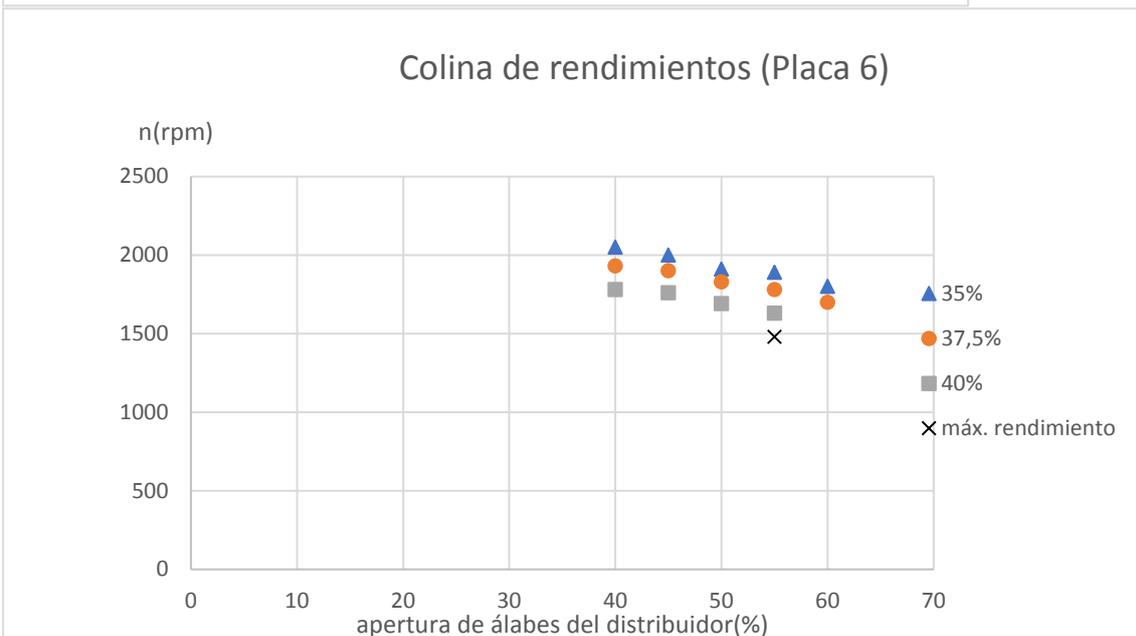
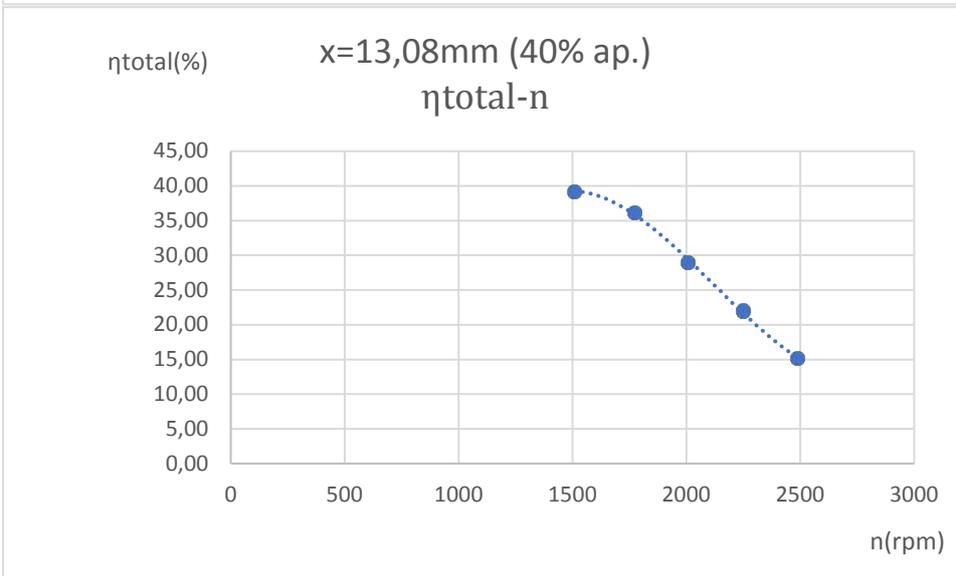
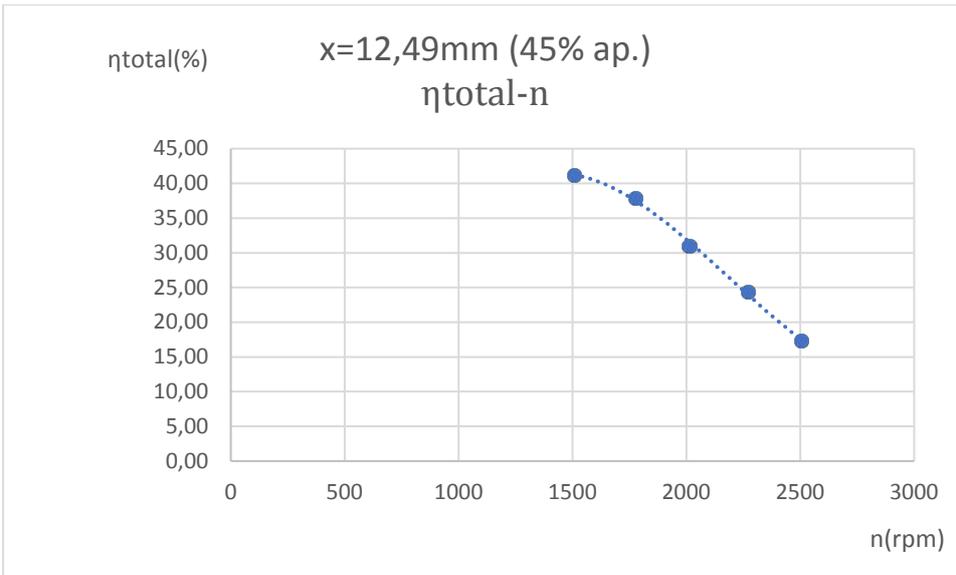






Placa 6 (apertura del rodete 83,3%)







En el punto de diseño:

Apertura rodete: 33,3%

Apertura distribuidor: 45%

n: 1800 rpm

H_{neta} : 8 m

P_{eje} : 478 W = 0,65 CV

Llegado a este punto, estamos en condiciones de calcular la “velocidad específica” en función de la potencia (n_s ; n° de Kammerer), y la velocidad específica adimensional (ω_s).

$$n_s(CV) = \frac{n(rpm) \cdot \sqrt{P_{eje}(CV)}}{H_{neta}^{\frac{5}{4}}} = \frac{1800 \cdot \sqrt{0,65}}{8^{5/4}} = 107,86$$

$$\omega_s(CV) = \frac{\omega \left(\frac{rad}{s}\right) \cdot \sqrt{\frac{P_{eje}}{\rho}}}{(g \cdot H_{neta})^{\frac{5}{4}}} = \frac{1800 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \sqrt{\frac{0,65}{1000}}}{(9,81 \cdot 8)^{\frac{5}{4}}} = 20,57 \cdot 10^{-3}$$



CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos, como se observa en la colina de rendimientos, se ha llegado a la conclusión de que el punto de diseño, para un salto de agua de 8 metros, es el correspondiente a una velocidad de rotación de la turbina de 1800 rpm, con una apertura de los álabes del rodete del 33,3%, que se consigue colocando la placa nº 3 y con una apertura del distribuidor del 45%, correspondiente a colocar el micrómetro en la posición 12,49 mm. Con estas condiciones se consigue una potencia en el eje de 478 W (0,65 CV) y una velocidad específica de 108, insuficiente para la colocación de una turbina Kaplan (ns entre 200 - 900). Lo más recomendable sería utilizar una turbina Francis.

Por otra parte, el rendimiento máximo, que se da en el punto de diseño, roza el 50 %. Este valor es inferior al que se suele obtener en este tipo de turbinas ($\approx 90\%$), debido a las reducidas dimensiones del equipo, lo que hace que aumenten las pérdidas.

Además, tanto en las colinas de rendimientos como en las gráficas $\eta_{\text{total}} - n$, se aprecia que para cada posición del distribuidor el rendimiento crece conforme se aumentan las revoluciones de la turbina, llega a un máximo y luego decrece, llegando hasta cero cuando la turbina está embalada. El punto de embalamiento se produce a unas revoluciones cada vez menores, al ir abriendo el distribuidor.

Del mismo modo, la curva $Q - n$ muestran, conforme aumentamos el número de revoluciones, un incremento del caudal hasta un máximo y un posterior decrecimiento de forma suave.

También podemos señalar que el máximo rendimiento para cada posición del distribuidor se da en las cercanías del máximo caudal de cada posición. Por otra parte, la curva $P_{\text{eje}} - n$, muestran que conforme aumentamos el número de revoluciones, un aumento de la potencia hasta un máximo y una disminución posterior.

También podemos señalar que el máximo rendimiento para cada posición del distribuidor se da en las cercanías de la máxima potencia de cada posición. Además, conforme se va abriendo el distribuidor, la potencia máxima para cada una de sus posiciones tiende a obtenerse para un régimen de revoluciones mayor.

PRÁCTICA 1

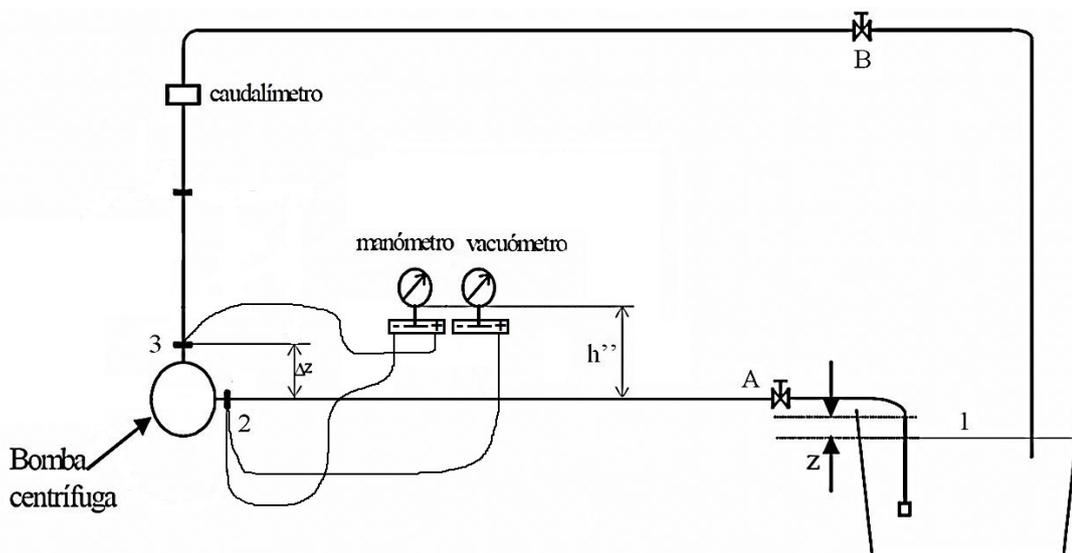
CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA



OBJETIVOS

- Obtener experimentalmente el NPSHd (Net Positive Suction Head disponible) de la instalación en su parte de aspiración, donde está instalada la bomba.
- Obtener el NPSHr (requerido) de la bomba en función del caudal para una velocidad nominal de $n = 1500$ rpm.
- Comparar los resultados obtenidos con los dados por el fabricante.

MONTAJE EXPERIMENTAL



FUNDAMENTO TEÓRICO

La cavitación en una bomba centrífuga se produce con la aparición y posterior colapso de cavidades en el fluido que atraviesa la bomba en la cara posterior de los álabes. Esto es debido a una caída de presión por debajo de la presión de vapor del líquido, a causa de la pérdida de carga (fricción, turbulencias) y al aumento de la energía cinética.

La presión mínima a la entrada de la bomba para evitar esta formación de burbujas y la posterior cavitación para un flujo determinado, se conoce como NPSHr (Net Positive Suction Head requerido).

La NPSH disponible debe ser mayor que la NPSH requerida para evitar la cavitación. Las causas más frecuentes de que esta condición no se cumpla son:



- Aumento de la pérdida de carga en la línea de aspiración, bien por obstrucción de la tubería o por funcionamiento de la bomba con la válvula de aspiración semicerrada.
- Aumento de la presión de vapor del líquido al aumentar su temperatura.

La cavitación se manifiesta como una reducción del rendimiento de la bomba, ruido excesivo, alta vibración y desgaste en algunos componentes de la bomba, sobre todo en los álabes.

NPSHd (disponible)

La altura neta de entrada disponible (NPSHd) es la altura de carga (energía específica por unidad de peso) que tiene el líquido a la entrada de la bomba (sección 2 en el dibujo del montaje) disminuida en la altura de "presión de vapor". Tomando la sección de entrada a la bomba como origen de alturas y poniendo la presión en unidades absolutas:

$$NPSH_d = \frac{P_2(abs)}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} - \left((Z_2 - Z_1) + h_{f_{1 \rightarrow 2}} \right) - \frac{P_v}{\rho g}$$

El NPSHd depende de la instalación en la aspiración, del líquido bombeado, de su temperatura y de la presión atmosférica. Como la altura de pérdidas $h_{f_{1-2}}$ es, aproximadamente, proporcional al cuadrado del caudal, el NPSHd se podrá modelar con una expresión del tipo:

$$NPSH_d = a - b \cdot Q^2$$

Al ser una característica de la instalación, no de la bomba, depende de la apertura de la válvula A. Distintas aperturas de esta válvula significan distintas instalaciones.

Determinaremos el NPSHd (disponible) correspondiente a la instalación con la **válvula A totalmente abierta**.

Expresión del NPSHd:

$$NPSH_d = \frac{P_2(abs)}{\rho g} + \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 g D^4} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (1)$$



El valor $P_v/(\rho g)$ se obtiene interpolando en la siguiente tabla:

Temperatura del agua (°C)	$P_v/(\rho g)$ (m)
10	0,12
15	0,17
20	0,25
25	0,33
30	0,44

La tubería de aspiración es de PVC y tiene un diámetro interior: $D = 67,8$ mm.

La presión absoluta a la entrada de la bomba la calcularemos de la siguiente manera:

$$\frac{P_2(abs)}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + \frac{P_{vacuó}}{\rho g} + h''$$

- La $P_{vacuó}$, negativa, viene dada en (bar) en el manómetro digital correspondiente. Pasaremos la medida a S.I. multiplicando el valor obtenido por 10^5 .
- La altura h'' entre la bomba y el vacuómetro es 0,35 m.
- La P_{atm} la obtendremos mediante un barómetro de mercurio colocado en la primera columna del laboratorio, midiendo la altura de mercurio en mm y su temperatura, que será aproximadamente la del ambiente. En Pamplona, un valor medio ronda los 720 mm Hg.

H=.....mm Hg (local, no estándar)

Tªambiente.....°C

Esta altura la tenemos que transformar a la que tendríamos si el mercurio estuviera a 0° C y fuera atraído por una g estándar, obteniendo así los mm de mercurio estándar, que son unidades de presión, siendo:

$$g(\text{estándar})=9,80665\text{m/s}^2 \quad \text{y} \quad g(\text{pamplona})=9,803\text{m/s}^2.$$

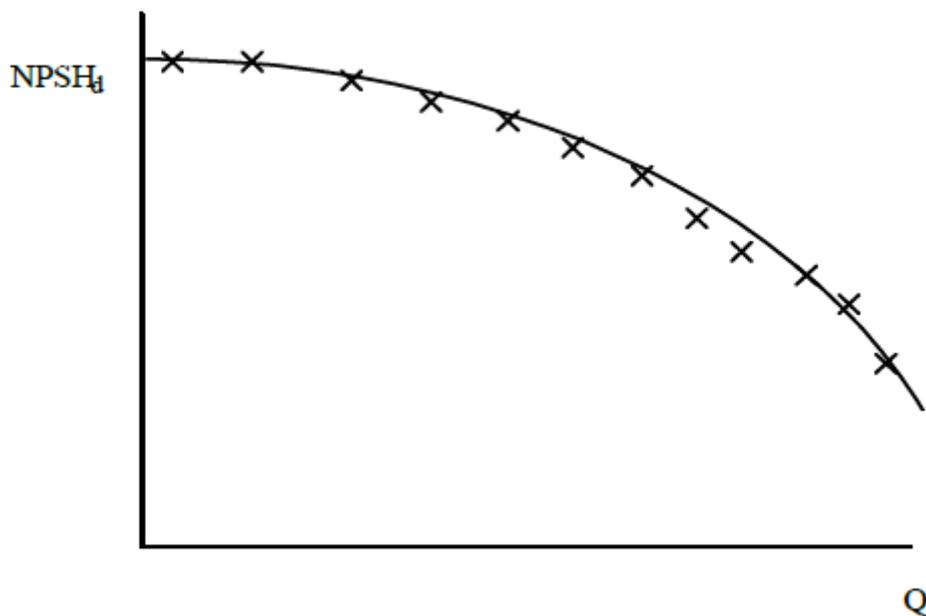
La corrección viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{atm}(\text{mm Hg}) = H - 0,3 - 0,0000171 \cdot H \cdot Tª(°C)$$

Obteniendo un valor de:

$$P_{atm} = \text{.....mmHg}$$

Se recuerda que 760 mm Hg (puro, a 0° C y con una g estándar) = 1013,25 mbar.



NPSHr (requerido)

La "altura neta de succión positiva" requerida por la bomba es la altura de carga mínima en la entrada (sección 2) que la bomba necesita para no cavitarse, disminuida en la altura de presión de vapor del líquido bombeado. Es algo que depende de la bomba, no de la instalación. Normalmente la proporciona el fabricante de la bomba.

$$NPSHr = \left(\frac{P_2(abs)}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \right)_{\text{mínimo}} - \frac{P_v}{\rho g}$$

En la definición anterior la entrada a la bomba se toma como origen de alturas. Las medidas de la presión absoluta en la aspiración (entrada a la bomba) P₂ y la velocidad media V₂ en la entrada a la bomba, en la tubería de aspiración, se harán cuando la bomba esté trabajando en una situación **límite entre cavitarse y no cavitarse**.

Cuando la bomba cavita, el fluido bombeado es una mezcla de agua líquida, burbujas de vapor (debido a la muy pequeña parte del líquido que ha cambiado de estado) y burbujas de aire que el líquido tenía disuelto. La densidad del fluido bombeado, mientras está pasando por la bomba, es menor cuando cavita. La altura útil de la bomba expresada en metros de columna del fluido bombeado disminuirá debido a que disminuye el rendimiento hidráulico (mayor turbulencia por la presencia de burbujas).



En consecuencia, la altura de la bomba que medimos experimentalmente cuando la bomba cavita será menor que cuando no cavitaba, debido a que la expresamos en metros de columna de agua y no en metros de columna de agua con burbujas.

Se ha convenido internacionalmente que la situación límite entre cavitarse y no cavitarse, lo que también podríamos llamar de cavitación incipiente, se produce cuando la altura útil proporcionada por la bomba es un **3% menor** que la que daría sin cavitarse, con el mismo caudal, ambas expresadas en metros de columna de agua sin cavidades, sin burbujas.

En esa situación límite de cavitación incipiente, el NPSHr de la bomba coincide con el NPSHd de la instalación. Calculando el NPSHd en ese punto tendremos el NPSHr.

NPSHr = NPSHd (en cavitación incipiente, definida por el 3%)

Como se necesita la curva característica H - Q , recordemos la altura de la bomba viene definida por la expresión:

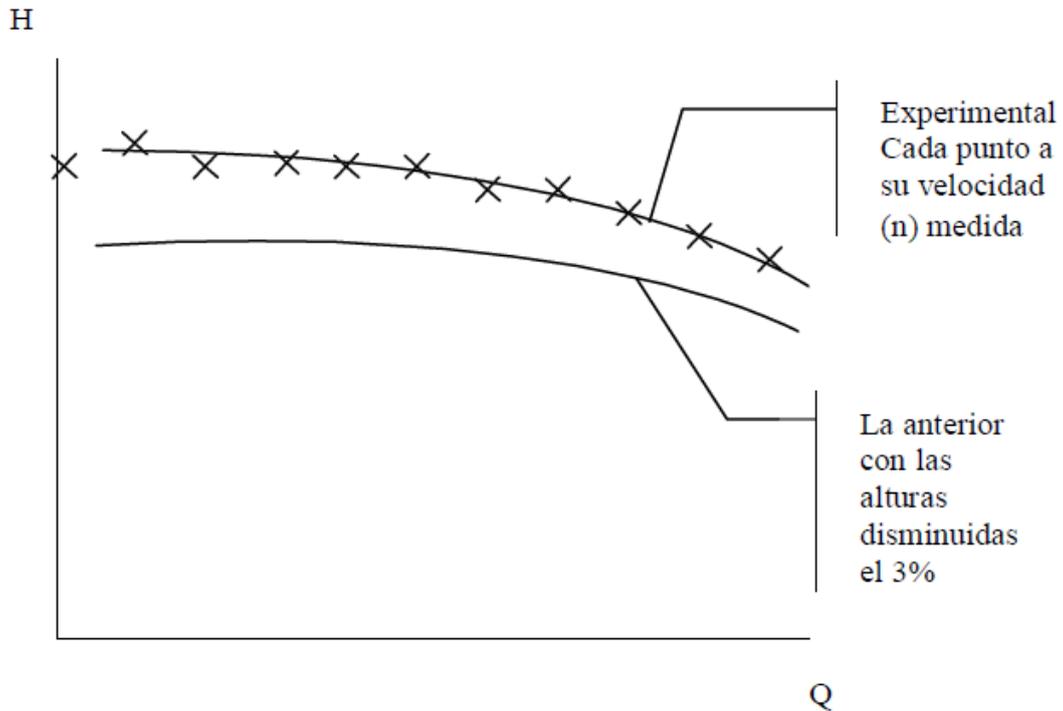
$$H_b = \frac{P_{\text{manómetro}} + |P_{\text{vacuómetro}}|}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi} \right)^2 \left\{ \frac{1}{D_3^4} \left(1 + f \frac{L}{D_3} \right) - \frac{1}{D_2^4} \right\} \quad (2)$$

Siendo un valor medio de $f \approx 0,02$ y $L=0,16$ m.

D3 (tubería de impulsión)= 53,6 mm. D2 (tubería de aspiración)= 67,8 mm.



Con la expresión (2) calcularemos la altura útil para una serie de puntos experimentales (datos recogidos en la práctica 6), y construiremos la gráfica (H – Q) y la deducida de ésta reduciendo las alturas un 3%.



METODO DE DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL NPSHr

Comenzamos con las válvulas en la aspiración y en la impulsión totalmente abiertas. En esta situación la bomba no puede dar caudales suficientemente grandes como para producir cavitación. Estrangulando poco a poco las válvulas de impulsión (válvulas B) barreos los caudales posibles desde el máximo hasta cero, y midiendo: caudales, presión en el vacuómetro, en el manómetro, y velocidad de la bomba, obtenemos la curva característica (H-Q) en condiciones normales, sin cavitación, cada punto estará referido a la velocidad (n) que se haya medido.

A continuación, estrangulamos parcialmente la válvula de aspiración (válvula A), de modo que, con las válvulas de impulsión totalmente abiertas, se vea que la bomba cavita de forma clara (se notará en el aspecto lechoso del agua en la tubería de aspiración, y en el mayor ruido producido por la bomba).

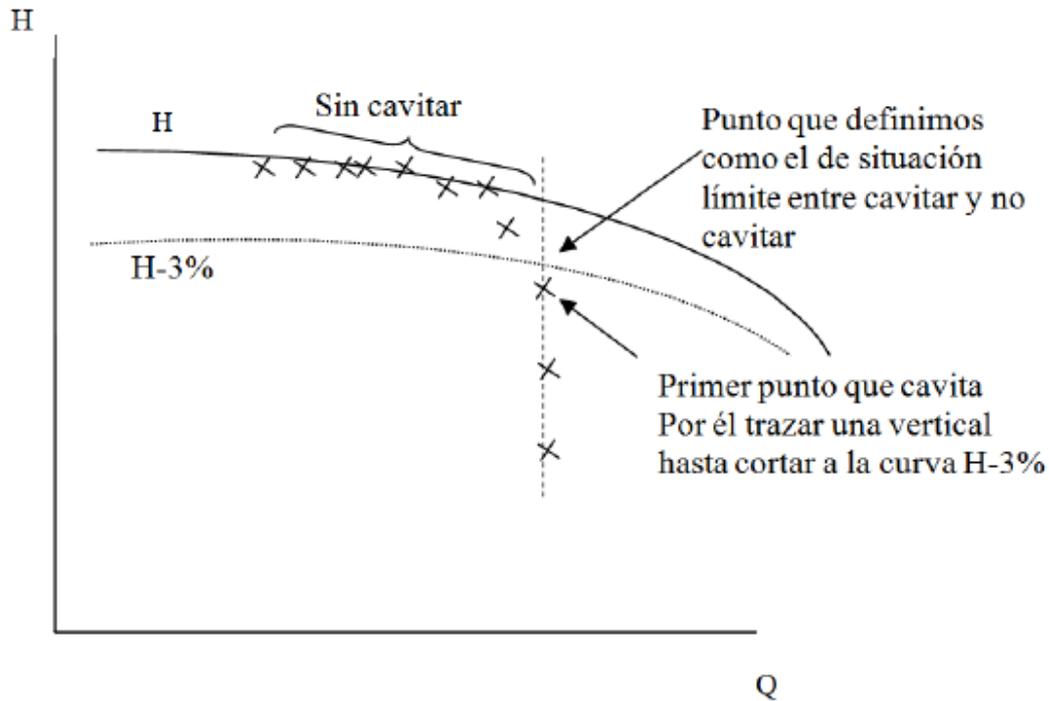


Con esta estrangulación en la aspiración (válvula A) **fija**, vamos estrangulando progresivamente las válvulas de impulsión hasta que la bomba, claramente, deje de cavitarse. Para tener un mayor número de datos de la bomba sin cavitarse, las válvulas de impulsión se cerrarán hasta que el caudal sea en torno a 10 m³/h menor que el de cavitación. A partir de este momento tomaremos datos del caudal, presiones a la entrada y salida de la bomba, velocidad de la bomba, a medida que aumentamos, poco a poco el caudal (de 3 en 3 m³/h aproximadamente), abriendo las válvulas de impulsión, hasta hacer cavitarse la bomba. Una vez que se alcanza la cavitación, se seguirán cerrando las válvulas de impulsión, hasta tomar los valores de otros 3 o 4 puntos (en estos se observará que el caudal apenas varía).

Al aumentar el caudal, los puntos experimentales, irán recorriendo la curva característica (H-Q) mientras no haya cavitación. Cuando ésta comience, la bomba no será capaz de producir las alturas de la curva característica, y los puntos experimentales se situarán por debajo de la curva (H-Q).

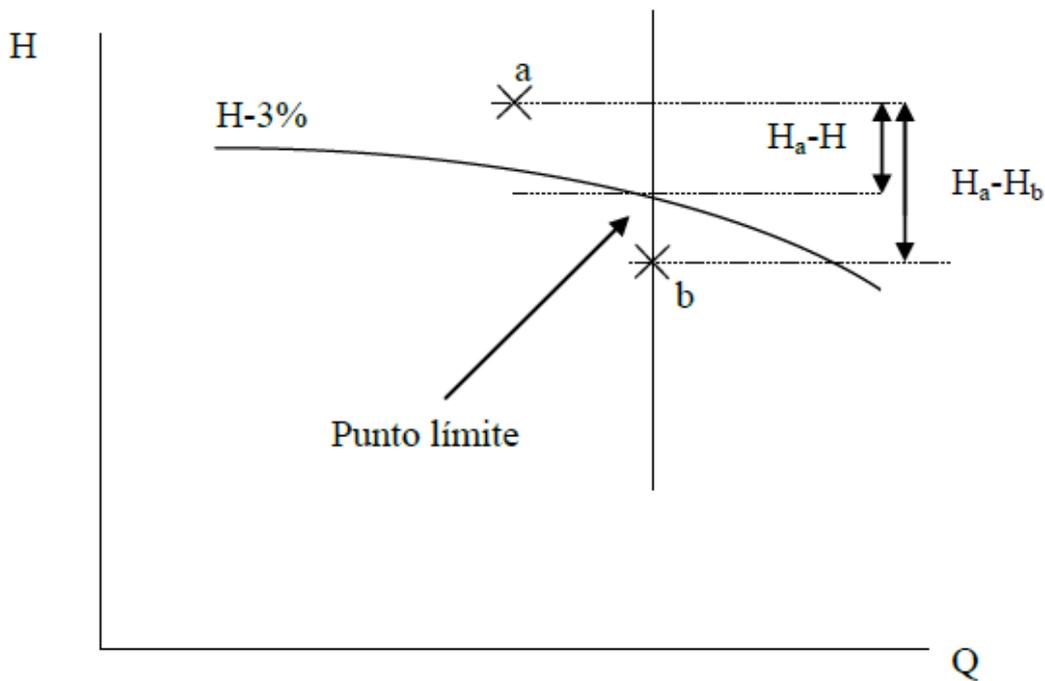


Construiremos una gráfica como la siguiente:



En esta gráfica, la curva (H - Q) y los puntos experimentales corresponden a la velocidad (n) que en cada punto hayamos medido. Por el punto experimental que esté más cercano a la curva (H-3%) y por debajo de ella, trazamos una línea vertical. La intersección entre esta vertical y la curva (H-3%) lo tomamos como el punto que define la situación límite entre la cavitación y la no cavitación. Esta elección está basada en lo que indica la experiencia. Los puntos obtenidos por debajo de la curva (H-3%) están aproximadamente en una misma vertical ($Q \approx cte$).

El NPSHr (requerido) lo calculamos con los datos correspondientes a ese punto límite. El caudal del punto límite, será el mismo que el del punto inmediatamente por debajo de la curva (H-3%), por el que se ha trazado la vertical. La presión del vacuómetro y la velocidad de la bomba las obtendremos por interpolación lineal entre los dos puntos experimentales más cercanos al punto límite, el inmediatamente por encima y el inmediatamente por debajo de la curva (H-3%).



La presión del vacuómetro en el punto límite sería, aproximadamente:

$$\frac{P(\text{vacuómetro, punto}(a)) - P(\text{vac.}(b))}{P(\text{vacuómetro, punto}(a)) - P(\text{vac.}(\text{límite}))} = \frac{H(a) - H(b)}{H(a) - H(\text{límite})}$$

Despejamos la presión que habría indicado el vacuómetro en el punto límite, si éste hubiera sido experimentado.

La velocidad de la bomba en el punto límite sería, aproximadamente:

$$\frac{n(\text{punto}(a)) - n(\text{punto}(b))}{n(\text{punto}(a)) - n(\text{límite})} = \frac{H(a) - H(b)}{H(a) - H(\text{límite})}$$

Despejamos la velocidad que habría tenido la bomba en el punto límite, si éste hubiera sido experimentado.

Con los datos obtenidos calculamos el NPSHr (requerido) para ese caudal.

$$NPSH_{requerido} = \frac{P_{atmosférica}}{\rho g} + \frac{P_{vacuómetro}(\text{límite})}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi} \right)_{límite}^2 + h'' - \frac{P_{vapor}}{\rho g} \quad (3)$$

El NPSHr calculado corresponde al caudal Q y a la velocidad n del punto límite. Nos interesa calcular el NPSHr en función del caudal, para una velocidad de referencia, común para todos los puntos. Ésta puede ser un valor medio de las velocidades medidas, pero en nuestro caso tomaremos 1480 rpm.

Convertimos el NPSHr y el caudal Q obtenidos experimentalmente, a los que habríamos obtenido a la velocidad de referencia de 1480 rpm.

$$\frac{NPSH_{requerido}(n)}{NPSH_{requerido}(1480)} = \left(\frac{n}{1480}\right)^2$$

$$\frac{Q(n)}{Q(1480)} = \frac{n}{1480}$$

Ya hemos calculado un punto de la curva (NPSHr – Q) a 1480 rpm correspondiente a una primera posición fija de la válvula de aspiración. Cerrando un poco más la válvula de aspiración obtenemos una segunda posición, y con ella un segundo punto de la curva (NPSHr – Q) a 1480 rpm. Y así sucesivamente hasta obtener varios puntos. Con estos puntos se construirá la curva (NPSHr – Q) para una velocidad de la bomba de n=1480 rpm.

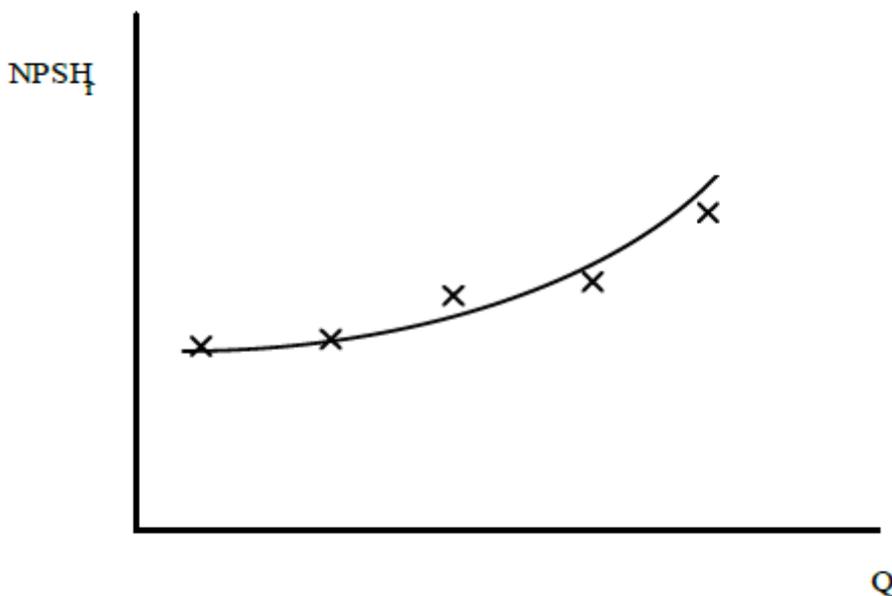




TABLA DE VALORES MEDIDOS Y CALCULADOS.

Tablas correspondientes a las diferentes posiciones fijas de la válvula de aspiración.

Posición válvula A (º)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
35					

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)

Posición válvula A (º)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
40					

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)



Posición válvula A (°)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
45					

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)

Posición válvula A (°)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
50					

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)



Posición válvula A (º)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
55					

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)

Posición válvula A (º)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
60					

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)

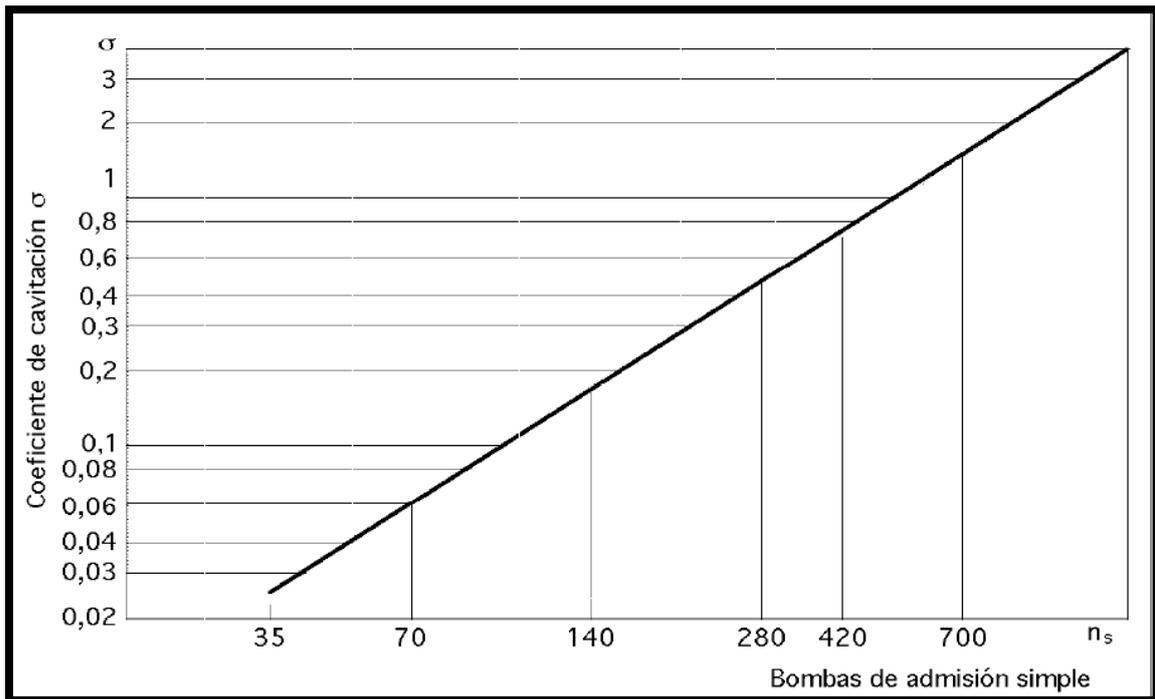


COEFICIENTE DE CAVITACIÓN O DE TOMA

Se define como el cociente entre el NPSH requerido y la altura de la bomba, en el punto de máximo rendimiento.

$$\sigma = \frac{NPSHr}{H} \Bigg|_{\mu \text{ máx}}$$

Es un parámetro indicativo del margen de seguridad del funcionamiento de la bomba con respecto a la cavitación.



Si el coeficiente σ está por encima de la recta diagonal que divide la gráfica $\sigma - ns$, es poco probable que la bomba cavite, mientras que si está por debajo, existe un riesgo alto de cavitación.

La velocidad específica (ns) se calcula de la manera siguiente:

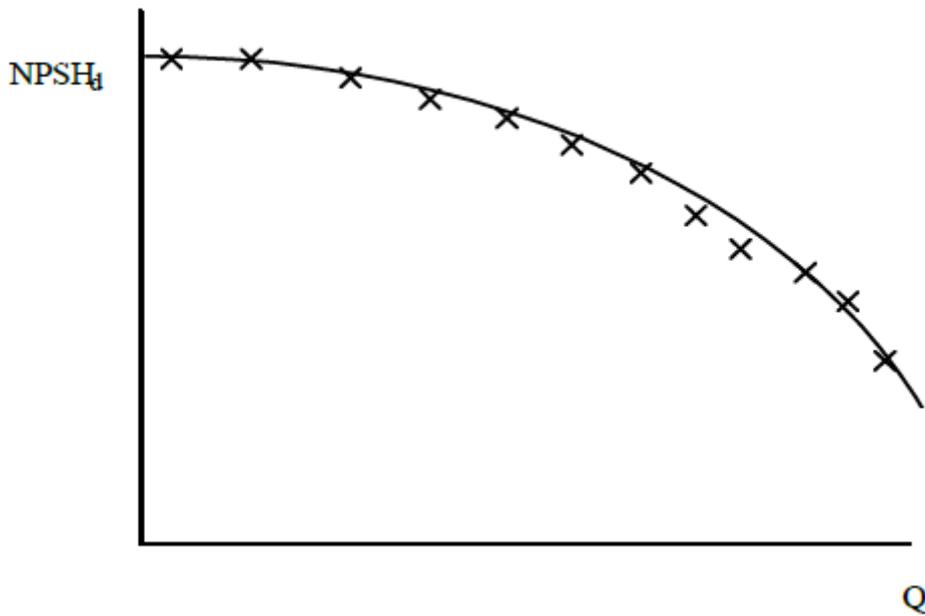
$$n_s = \frac{n(\text{rpm}) \cdot \sqrt{P_{eje}(CV)}}{H_{neta}^{5/4}} \Bigg|_{\text{Punto de diseño } \mu \text{ máx}}$$

Si entre los puntos experimentales no está el punto de diseño de la bomba, el de máximo rendimiento, tendremos que interpolar o extrapolar para obtener el coeficiente de cavitación y la velocidad específica ns , y así dibujar el punto correspondiente a nuestra bomba en el diagrama anterior, comparando nuestra bomba con el comportamiento estándar dado en la bibliografía.

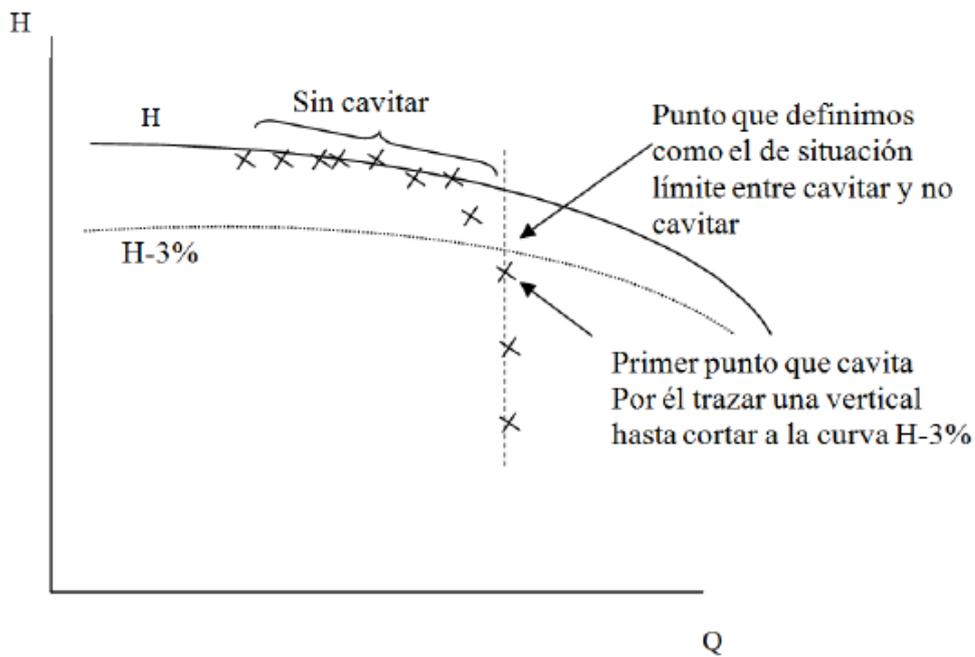


TRABAJO A REALIZAR

- Rellenar las tablas de datos medidos y calculados.
- Dibujar las gráficas siguientes:
 - Gráfica NPSH_d – Q a partir de los datos de la práctica de las curvas características de una bomba:

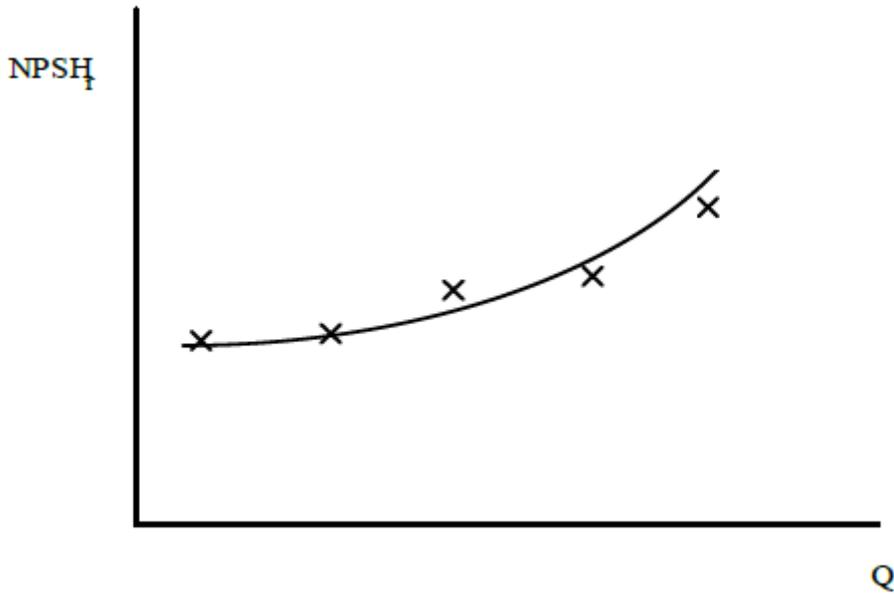


- Gráficas H – Q a partir del primer método, para cada posición de la válvula de aspiración:

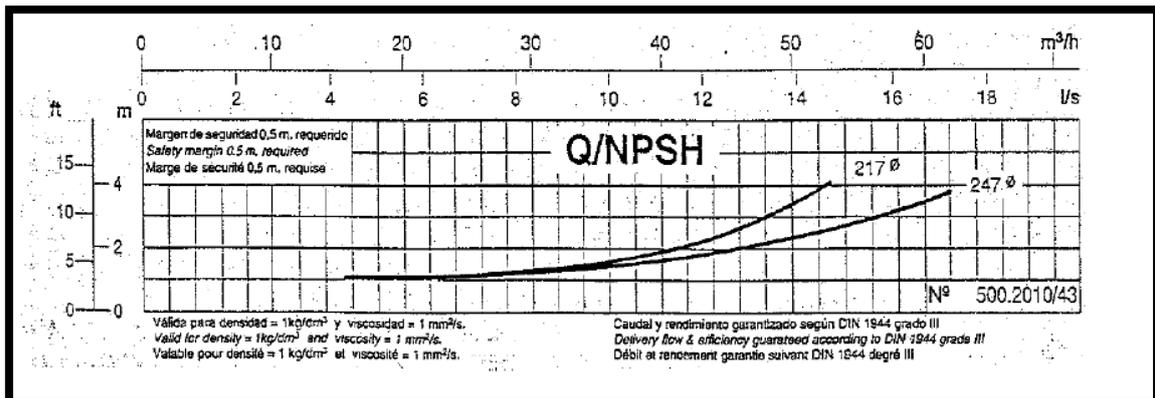




- Gráfica NPSHr – Q a la velocidad de 1480 rpm:



- Comparar también los resultados obtenidos con los dados por el fabricante, cuyas gráficas se adjuntan, dibujando en ellas los puntos experimentales NPSHr. No olvidar que el fabricante ha dado las curvas a 1430 rpm y para diámetros del rodete o impulsor de 247mm o 217mm. Nuestra bomba ensayada tiene un diámetro de 241mm.
- Comparar los datos obtenidos con la gráfica $\sigma - ns$.
- Comentarios e interpretación de los resultados.





TABLAS DE RESULTADOS MEDIDOS EN EL LABORATORIO

Q (m ³ /h)	P _{vacuómetro} (bar)	NPSHd (m)
67	1,13	3,72
63	1,31	4,88
60	1,42	5,33
57	1,53	5,73
54	1,62	6,17
51	1,69	6,50
48	1,76	6,87
44	1,84	7,33
41	1,91	7,64
38	1,95	7,97
35	1,99	8,18
33	2,01	8,32
30	2,05	8,52
27	2,08	8,72
24	2,11	8,88
21	2,12	8,99
18	2,13	9,11
15	2,14	9,21
12	2,14	9,31
9	2,14	9,37
6	2,13	9,45
3	2,12	9,57
0	2,10	9,83

Tablas correspondientes a las diferentes posiciones fijas de la válvula de aspiración.

Posición válvula A (°)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
35	2,1	-0,39	27,5	1457	21,08
	2,08	-0,45	30	1457	20,81
	1,97	-0,49	32,5	1454	19,62
	2,01	-0,6	35	1454	19,95
	1,97	-0,69	37,5	1454	19,46
	1,96	-0,7	38	1454	19,34
	1,94	-0,75	39	1451	19,10
	1,8	-0,78	39	1451	17,67
	1,66	-0,85	39	1451	16,24
	1,45	-0,85	39	1451	14,10

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)
39	18,4	-0,76	1451	2,01	39,78	2,09	38,44	1,95

Posición válvula A (°)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
40	2,11	-0,61	27,5	1460	21,19
	2,06	-0,71	30	1457	20,61
	1,98	-0,78	32	1454	19,74
	1,98	-0,83	32,2	1454	19,73
	1,94	-0,83	32,2	1454	19,32
	1,88	-0,85	32,2	1454	18,71
	1,69	-0,86	32,2	1454	16,77

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)
32,2	19,73	-0,81	1454	1,76	32,78	1,83	31,67	1,71



Posición válvula A (º)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
45	2,15	-0,54	20	1463	21,76
	2,13	-0,67	22,5	1460	21,50
	2,04	-0,79	25	1457	20,53
	1,99	-0,83	25	1457	20,02
	1,95	-0,85	25	1457	19,61
	1,79	-0,85	25	1460	17,98

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)
25	20,53	-0,83	1457	1,44	25,39	1,48	24,54	1,38

Posición válvula A (º)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
50	2,18	-0,48	15	1463	22,14
	2,16	-0,61	17,5	1463	21,90
	2,05	-0,77	20	1463	20,74
	1,99	-0,81	20,5	1463	20,11
	1,79	-0,85	20,5	1460	18,07
	1,62	-0,85	20,5	1460	16,34

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)
20,5	21	-0,85	1463	1,27	20,74	1,30	20,04	1,22

Posición válvula A (º)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
55	2,17	-0,41	10	1466	22,10
	2,16	-0,6	12,5	1466	21,97
	1,96	-0,83	15,5	1463	19,89
	1,61	-0,85	15,5	1463	16,32
	1,85	-0,85	15,5	1463	18,77

Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)
15,5	21,18	-0,86	1464	1,17	15,67	1,19	15,14	1,11

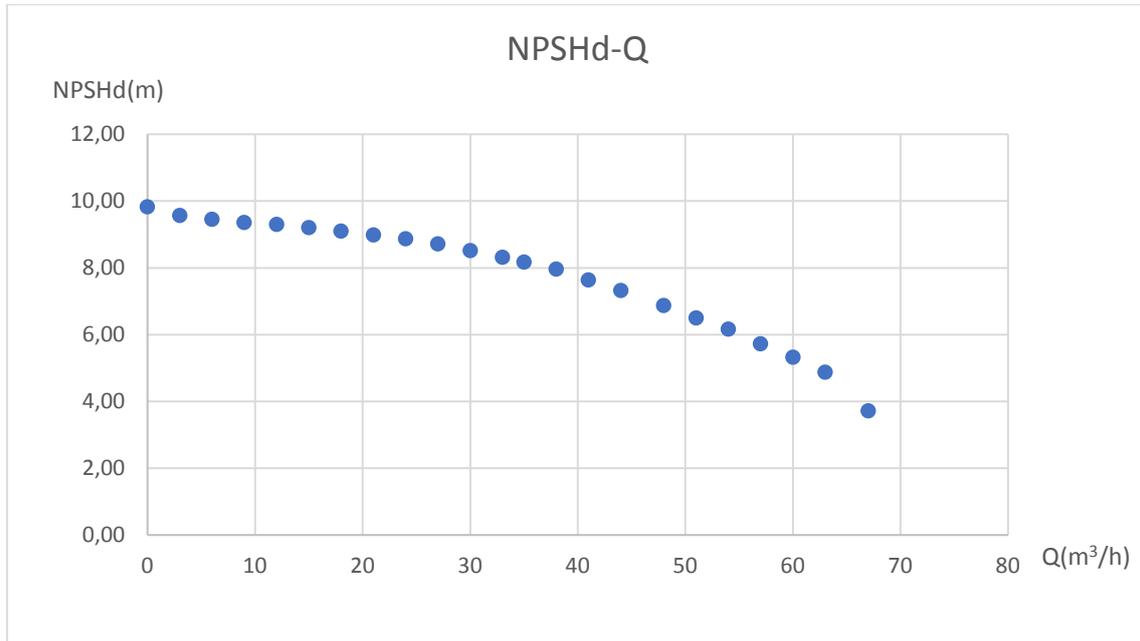


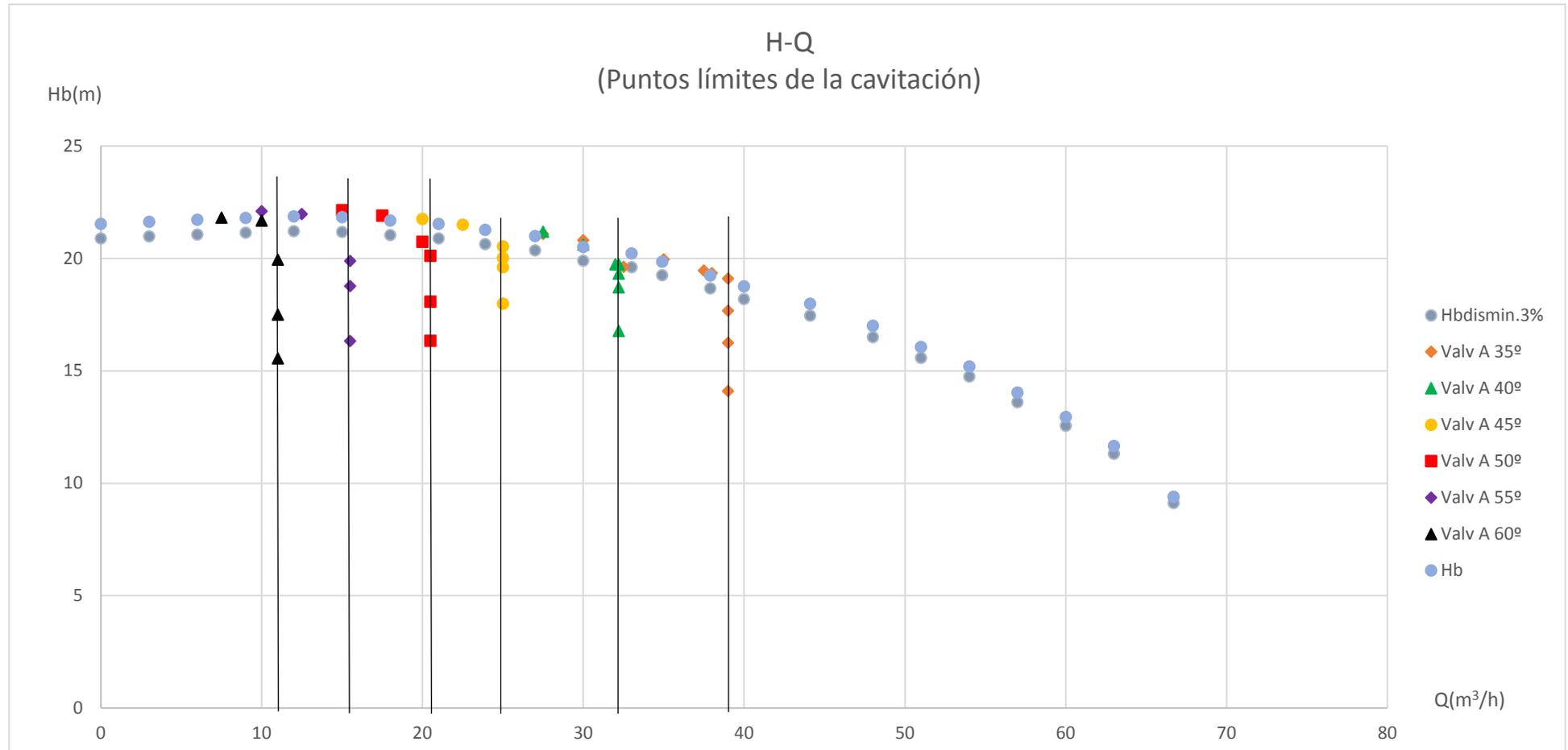
Posición válvula A (°)	P _{manómetro} (bar)	P _{vacuómetro} (bar)	Q (m ³ /h)	n (rpm)	H (m)
60	2,09	-0,24	5	1466	21,32
	2,14	-0,45	7,5	1466	21,81
	2,13	-0,72	10	1466	21,69
	1,96	-0,84	11	1463	19,94
	1,53	-0,86	11	1463	15,56
	1,72	-0,85	11	1463	17,50

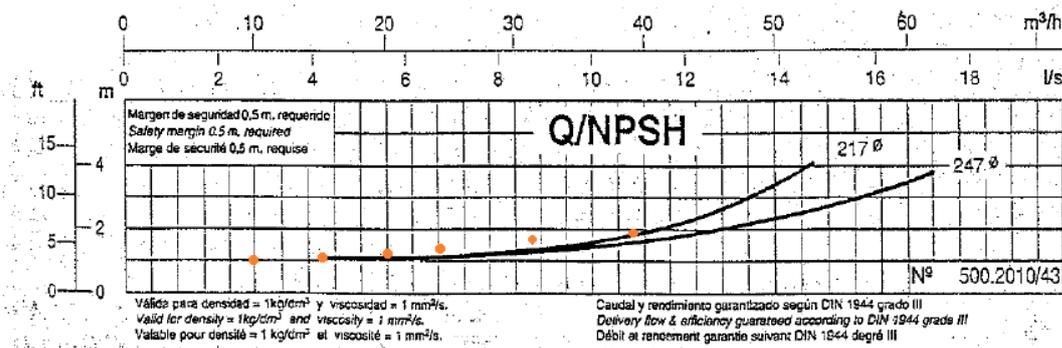
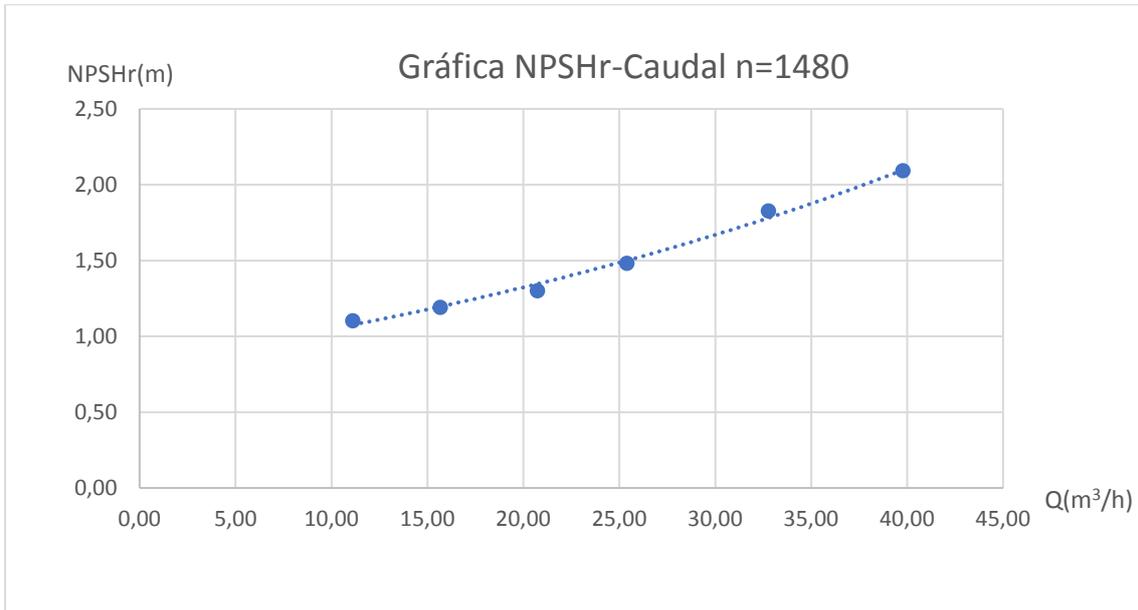
Punto límite					1480rpm		1430rpm	
Q (m ³ /h)	H (m)	P _{vacuómetro} (bar)	n (rpm)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)	Q (m ³ /h)	NPSHr (m)
11	21,2	-0,86	1464	1,08	11,12	1,10	10,74	1,03



Gráfica NPSHd-Q







El punto de diseño (proporcionado por el fabricante) es el siguiente:

$$Q = 38,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H = 20,5 \text{ m}$$

$$n = 1480 \text{ rpm}$$

$$P_{\text{teje}} = 3479,3 \text{ W} = 4,727 \text{ CV}$$

$$\text{NPSHr} = 1,5812 \text{ m (se ha obtenido por interpolación)}$$

$$\sigma = \frac{\text{NPSHr}}{H} \Bigg\}_{\mu \text{ máx}} = \frac{1,59 \text{ m}}{20,5 \text{ m}} = 0,776$$

$$n_s = \frac{n(\text{rpm}) \cdot \sqrt{P_{\text{eje}}(\text{CV})}}{H_{\text{neta}}^{5/4}} \Bigg\}_{\text{Punto de diseño } \mu \text{ máx}} = \frac{1480 \cdot \sqrt{4,727}}{20,5^{5/4}} = 73,767$$



CONCLUSIONES

A la vista de los resultados, podemos concluir que la curva que aparece en la gráfica NPSHd – Q tiene una forma decreciente, según lo esperado, debido al incremento de la altura de pérdidas proporcional al cuadrado del caudal ($b \cdot Q^2$). Por ello la curva NPSHd – Q experimental se aproxima a la ecuación:
$$\text{NPSHd} = a - b \cdot Q^2.$$

Por otra parte, en las gráficas H – Q se observa que los puntos experimentales en los que no se produce cavitación, se ajustan a la curva característica de la bomba. Sin embargo, una vez que aparece la cavitación, los valores experimentales se sitúan por debajo que la curva H – 3% y se ajustan a una recta vertical de caudal constante, ya que al intentar aumentar sin éxito el caudal abriendo las válvulas de impulsión, el resultado es una pérdida de presión a la salida de la bomba.

La gráfica NPSHr – Q muestra como los puntos obtenidos se ajustan a una curva creciente que se asemeja a una función exponencial, tal y como se esperaba. Al llevar estos puntos a la gráficas dada por el fabricante, vemos que no se ajustan a la curva de 241 mm de diámetro, si no a la de un diámetro algo mayor que 247 mm.

Por último, se ha calculado el coeficiente de cavitación o de Thoma en el punto de diseño, y se ha representado en la gráfica $\sigma - ns$. Dicho punto se encuentra por encima de la recta diagonal que divide la gráfica, pero cerca de ella, lo cual significa que es improbable que la bomba cavite en estas condiciones, aunque no está exenta de esta posibilidad.



5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

El presente proyecto es fruto del gran esfuerzo realizado a lo largo ocho meses que ha llevado su elaboración. Toda la dedicación que se le ha dado se ha visto recompensada con la adquisición de nuevos conocimientos y la profundización de los ya estudiados y asimilados durante la carrera.

Como resultado del tiempo y trabajo invertido, se han actualizado guiones de prácticas, ordenando su estructura, modificando algunas de sus partes, corrigiendo erratas y mejorando las figuras y gráficas. para su uso en las diversas asignaturas que el Área de Mecánica de Fluidos imparte a los dos grados implantados en la UPNA (Mecánica y Tecnologías Industriales).

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera ha sido dotar al Área de Mecánica de Fluidos de un número de prácticas disponibles para que el alumno adquiriera una formación académica más completa. Con los conocimientos adquiridos en las clases de teoría y con la ayuda de los guiones de prácticas, el alumno debería ser capaz de desarrollar las prácticas sin más que con una pequeña explicación, por parte del profesor, del manejo de los distintos componentes del laboratorio y normas de seguridad.

Cabe señalar que durante su desarrollo se han tenido que sortear una serie de problemas y contratiempos debidos en su mayoría al prolongado tiempo de inactividad de algunos equipos.

Por ejemplo, en el caso tacómetro de la turbina Kaplan tuvo que hacerse un ajuste. Dicho tacómetro está diseñado para medir la velocidad angular de la turbina Kaplan mediante un dispositivo electromagnético que cuenta el paso de ocho pernos atornillados al eje. La velocidad de rotación era demasiado alta para que el dispositivo distinguiera bien el paso de todos los pernos, y la medida era errónea. Esto se solucionó levantando el tacómetro de forma que este tan sólo detectara uno de los pernos y configurándolo de manera que proporcionase una buena medida.





6. BIBLIOGRAFÍA

- José Agüera Soriano, 2002, *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas (5ª edición actualizada)*, Ed. Ciencia 3, S.L.
- Frank M. White, 2004, *Mecánica de fluidos (Quinta edición)*, McGraw-Hill.
- Nicolás García Tapia, 2002, *Ingeniería Fluidomecánica (Segunda edición revisada y ampliada)*, Secretariado de publicaciones e intercambio editorial, Universidad de Valladolid.