

TURBOMÁQUINAS

Guía de Trabajo



Universidad Continental

Material publicado con fines de estudio

Código: ASUC016113



Presentación

La presente guía de estudios permite desarrollar los contenidos de los temas de turbomáquinas, a través de 16 sesiones de aprendizaje así mismo nos desafía a resolver una variedad de problemas, buscando la mejor estrategia de solución a nivel de grupo de trabajo. Además, la toma de decisiones frente a resolver problemas es una situación permanente dentro de la formación del futuro ingeniero.

Las bombas, ventiladores y turbinas, son turbomáquinas que siempre estarán presente dentro de la actividad profesional del ingeniero mecánico, frente a la necesidad de transportar fluidos o generar energía eléctrica.

Al finalizar la asignatura, el estudiante será capaz de analizar los fenómenos físicos relacionados con las turbomáquinas y poder seleccionarlas satisfaciendo las necesidades planteadas bajo restricciones realistas.

Deben tener en cuenta los estudiantes para la resolución de los diferentes problemas presentados en la guía, es necesario tener suficiente conocimiento teórico, para realizar un análisis correcto de cada uno de los problemas selectos que presentamos en esta guía y así tomar la mejor decisión de las diferentes estrategias generadas en base al esfuerzo grupal o individual.

El autor



Primera unidad

Semana 1

Turbomáquinas, clasificación y ecuación fundamental

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 1	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de resolver problemas de turbomáquinas utilizando la ecuación de Euler
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de la ecuación fundamental de las turbomáquinas (Euler)
- III. **Procedimientos**
- Una bomba positiva de corona directriz tiene una altura geométrica de aspiración de 2 m y una de impulsión de 14 m referidas al eje de la bomba. La velocidad del agua en la tubería de impulsión es de 2 m/s y C_m es constante en todo el recorrido e igual a 3 m/s ; $\beta_2 = 60^\circ$. Se desprecian las pérdidas en el interior y fuera de la bomba. La entrada en los álabes es radial. Calcular:
 - Velocidad periférica a la salida del rodete
 - Altura de presión a la salida del rodete.
 - Altura de la velocidad a la salida del rodete.
 - Ángulo que deberá haber a la entrada de los álabes directrices.



2. Una bomba centrífuga de agua que gira a 1000 rpm , tiene las siguientes dimensiones:
 $D_1 = 180 \text{ mm}$, $\frac{D_2}{D_1} = 2$, $b_1 = 30 \text{ mm}$, $b_2 = 20 \text{ mm}$, $\beta_1 = 20^\circ$; $\beta_2 = 30^\circ$. Entrada en los álabes radial; $\eta_h = 81\%$, $\eta_m = 95\%$, $\eta_{\text{motor eléctrico}} = 0.85$; las bridas de entrada y salida se encuentran a la misma cota; diámetro de la tubería de entrada 220 mm ; diámetro de la tubería de salida 200 mm . El desnivel entre el depósito de aspiración abierto a la atmósfera y la brida de aspiración asciende a $1,2 \text{ m}$. Calcular:
- Los triángulos de velocidad a la entrada y la salida del rodete. ($c, u, w, c_u, c_m, \alpha$) a la entrada y salida
 - Caudal de la bomba
 - Altura de Euler
 - Altura de Presión a la entrada de la bomba
 - Energía eléctrica consumida en 6 horas de funcionamiento de la bomba.
 - Altura de presión a la salida de la bomba.



Primera unidad

Semana 2

Bombas rotodinámicas - Curvas características

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 1	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: : Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de ubicar correctamente el punto de operación de una bomba rotodinámica
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de las curvas características de una bomba rotodinámica
- III. **Procedimientos**

1. Para ensayar una bomba a velocidad constante de $n = 3450 \text{ rpm}$. Se utiliza una instalación lo cual comprende un manómetro y un vacuómetro. Diámetro de la tubería de aspiración de 83 mm y de impulsión 79 mm , diferencia de cota entre la salida y la entrada de $1,2\text{m}$; a una válvula de compuerta, un freno PRONY para determinar el par al eje en kgf.m . Se bombea agua fría cuya densidad es 1000 kg/m^3 . La tabla muestra las lecturas de los diferentes parámetros para diferentes variaciones de caudal. Trazar las curvas características H-Q, Peje-Q y | .

	1	2	3	4	5	6
$Q(\text{lt/s})$	0	2	4	5	6	7
$P_S(\text{kgf/cm}^2)$	3.9	3.86	3.50	3.26	2.78	1.85
$P_E(\text{kgf/cm}^2)$	0.16	0.17	0.20	0.22	0.25	0.28



$M(kgf.m)$	0.56	0.60	0.76	0.83	0.965	1.09
------------	------	------	------	------	-------	------

2. En un ensayo de una bomba centrífuga que gira a 1000 rpm se tiene los siguientes resultados:

$Q(m^3/s)$	0	4.5	9	13.5	18	22.5
$H(m)$	23.6	23.2	21.6	19.5	14.1	0

Esta bomba esta conectada a una tubería cuya ecuación es: $h = 15 + 20 \times 10^{-3} Q^2$ donde $Q(m^3/s)$ y h en m .

Determinar:

- El punto de operación de la bomba y la magnitud de las pérdidas de la tubería para este punto.
 - El nuevo rpm para reducir el caudal a la mitad mediante un cambio de la velocidad de rotación.
3. Se quiere diseñar una fuente formada por un solo chorro de altura variable, vertical. La salida del chorro se sitúa 3 m por encima de la lámina de agua del depósito despresurizado de alimentación A. Se proyecta una instalación de bombeo que suministra el caudal necesario a la fuente, formada por una tubería de hierro galvanizado de 175 mm de diámetro y una longitud equivalente total de 75 m. La boquilla de salida del chorro de 80 mm de diámetro tiene un factor de paso de 0,8 con la energía cinética de salida. Se pide:
- Dibujar el esquema de la instalación y calcular la expresión analítica de la curva característica de dicha instalación.
 - Seleccionar la bomba más adecuada para que la altura del chorro sea como mínimo de 8 m.
 - Calcular el punto de funcionamiento (Q, H), el rendimiento de la bomba η , la potencia absorbida y el costo por m^3 si el precio del kWh es de 15 soles.
 - Si queremos que en intervalos determinados la altura del chorro disminuya a 5 m, hallar la pérdida de carga que habrá que introducir mediante una válvula de regulación de caudal.



Primera unidad

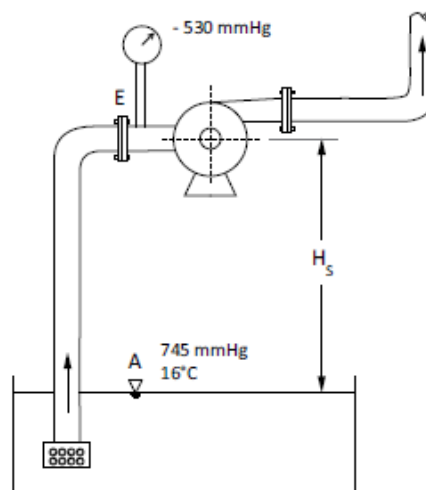
Semana 3

Cavitación y golpe de ariete

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 1	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de analizar el fenómeno de cavitación y golpe de ariete en una bomba rotodinámica
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico del fenómeno de cavitación y golpe de ariete de una bomba rotodinámica
- III. **Procedimientos**
 - 1. Las características nominales de una bomba radial, cuya tubería de aspiración tiene un diámetro de 110mm , con un espesor de 7.5mm , son las siguientes: $\text{Caudal} = 1850\text{L}/\text{min}$, $H = 35\text{m}$, $\text{Pérdidas totales en tubería de aspiración} = 1.15\text{m}$





Se realiza un ensayo de cavitación a una presión atmosférica de 745mmHg y a una temperatura del agua de 16°C , aumentando gradualmente la altura de aspiración. El inicio de la cavitación se produce cuando el vacuómetro conectado a la entrada de la bomba marca una presión de -530mmHg . Calcular:

- a) El coeficiente de cavitación de la bomba y $NPSH_{necesario}$
 - b) La altura de aspiración máxima de esta bomba
2. Una bomba de eje vertical de 7 etapas bombea $684\text{ m}^3/\text{h}$ agua a 85°C , una altura de bombeo de 210m con una velocidad de rotación de 1180 rpm . El agua es aspirado a presión atmosférica y a nivel del mar, si las pérdidas en la succión es 1.4m . Determinar:
- a) La altura máxima de aspiración en metros
 - b) Trazar un esquema de la instalación
 - c) Determinar la cifra de presión si está expresado por la siguiente expresión: $S_q = \frac{n\sqrt{Q}}{\Delta h^{3/4}}$



Primera unidad

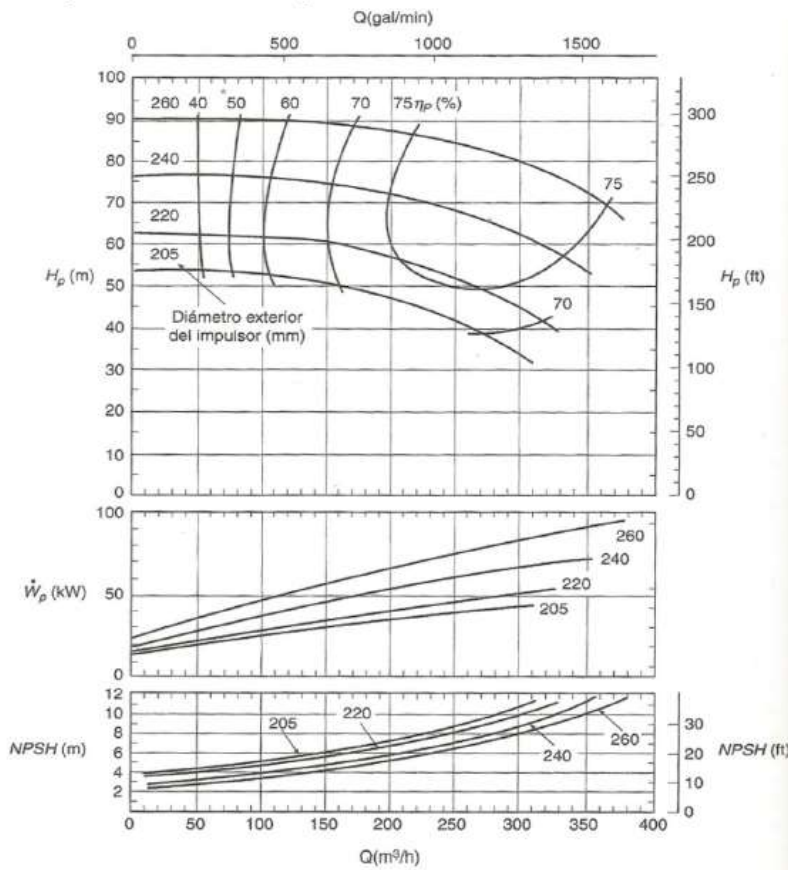
Semana 4

Asociación de bombas en serie y paralelo

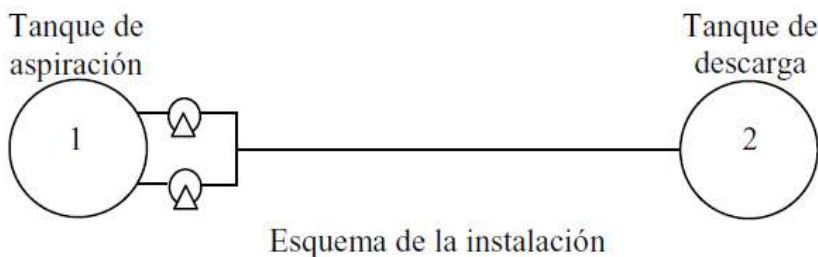
Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 1	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

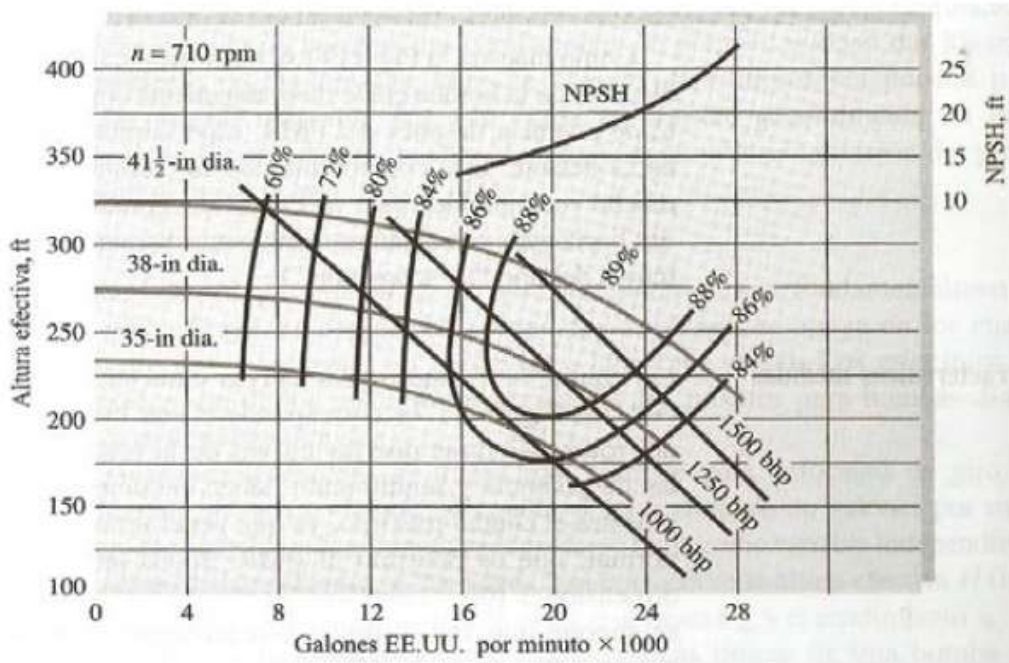
Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de analizar el comportamiento de la asociación de bombas en serie y paralelo
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico asociación de bombas en serie y paralelo
- III. **Procedimientos**
 1. Se bombeará petróleo crudo ($DR = 0.86, \nu = 0.000019 \text{ m}^2/\text{s}$) a través de 5 Km de una tubería de hierro colado de 450 mm de diámetro. El aumento de altitud entre el extremo corriente arriba y el extremo corriente abajo es de 180 m. Si una bomba con la que se cuenta es la máquina de flujo radial de 240 mm de diámetro de la figura. ¿Cuántas bombas en serie se necesitan para lograr la operación más eficiente? calcule la potencia mecánica requerida.



2. Las dos bombas de 35 *pulg* de la figura están combinadas en paralelo para mover agua a $60^\circ F$ a través de 1550 *pies* de conducto horizontal. Si la $f = 0,025$, ¿Cuál es el diámetro del conducto que asegure un caudal de 35000 *galmin* ?. ¿Cuál es la eficiencia del sistema en paralelo?







Segunda unidad

Semana 5

Ventiladores - Ecuaciones fundamentales

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 2	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de analizar las ecuaciones de funcionamiento de los ventiladores
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de las ecuaciones fundamentales en los ventiladores.
- III. **Procedimientos**
 1. Un soplante de un hogar tiene que trabajar contra una presión estática de 8 mbar. El hogar necesita 15 Kg de aire ($\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$) por cada kg de carbón quemado y se queman 40 toneladas de carbón por hora. El rendimiento total del ventilador es de 65 %. La velocidad del aire impulsado es 10 m/s. Calcular la potencia necesaria en el motor para accionamiento de este ventilador.
 2. Un ventilador centrífugo impulsa aire de la atmósfera a razón de 240 m³/min, a través de una salida rectangular de chapa, cuyas dimensiones son 800 X 400 mm. El ventilador gira a 750 r.p.m. El diámetro de entrada del rodete es 500 mm, y el de salida es 800 mm. El aire entra radialmente en el rodete a 15 m/s. $\beta_2 = 70^\circ$, $b_2 = 100 \text{ mm}$. En la caja espiral se consigue un aumento de presión equivalente al 30% de altura de velocidad a la salida del rodete, en el cual las pérdidas ascienden a un 25% de la misma altura de velocidad.



Densidad del aire 1.2 kg/cm^3 ; $v = 1$; $m = 0.92$. Despréciense el influjo del espesor de los álabes. (despréciense las pérdidas en las embocaduras e inclúyanse las pérdidas desde la salida del rodete hasta la salida del ventilador en las pérdidas en la caja espiral).
Calcular:

- a) Rendimiento hidráulico del ventilador.
- b) Potencia de accionamiento.
- c) Presión estática en *mbar* a la salida del ventilador.



Segunda unidad

Semana 6

Ventiladores -Curvas características

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 2	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de ubicar el punto de funcionamiento de un ventilador
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de las curvas de ensayo en los ventiladores.
- III. **Procedimientos**

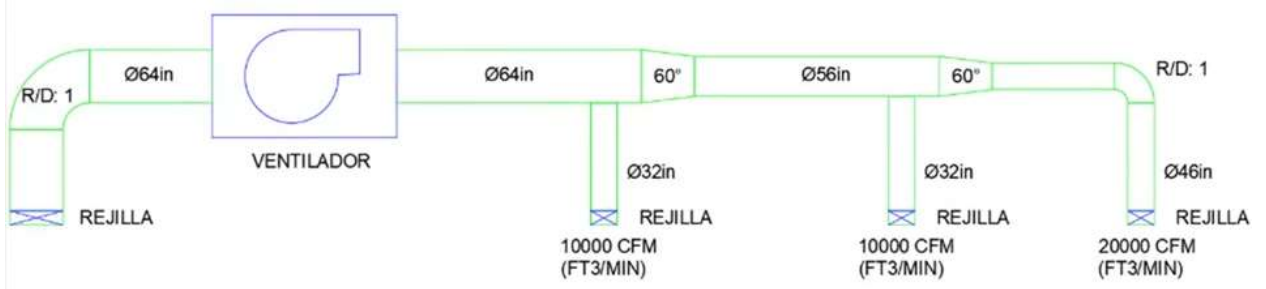
1. El ensayo de un ventilador a 1440 rpm arroja los siguientes datos

$Q(m^3/h)$	100	350	700	1000	1600	2000
$H(m)$	45.8	43.2	44.2	43.5	39.5	32.2

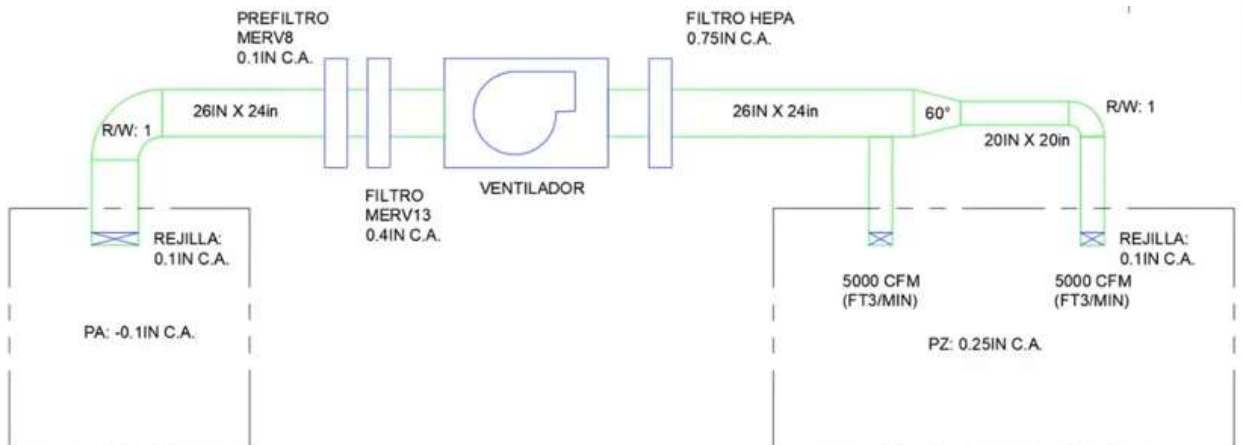
- a) Trace Ud., La curva potencia aerodinámica $P - Q$; P en kW y Q en m^3/h
- b) Cuando el ventilador suministra aire a un ducto (sistema) el caudal resultante es de $1350m^3/h$. Determine Ud. Las pérdidas de presión en el ducto en $mm de H_2O$ y luego trace la curva parabólica del sistema.
- c) Si se desea reducir el caudal de $1000m^3/h$. Determine Ud los rpm del ventilador
- d) Si se desea reducir el caudal a $1000m^3/h$, mediante estrangulamiento con una
- e) válvula. Determine Ud. La caída de presión en la válvula en $mm de H_2O$



2. Calcular las pérdidas estáticas del sistema de ductos mostrado:



3. Calcular las pérdidas estáticas y potencias del sistema de ductos mostrado.





Segunda unidad

Semana 7

Asociación de ventiladores serie y paralelo

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 2	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

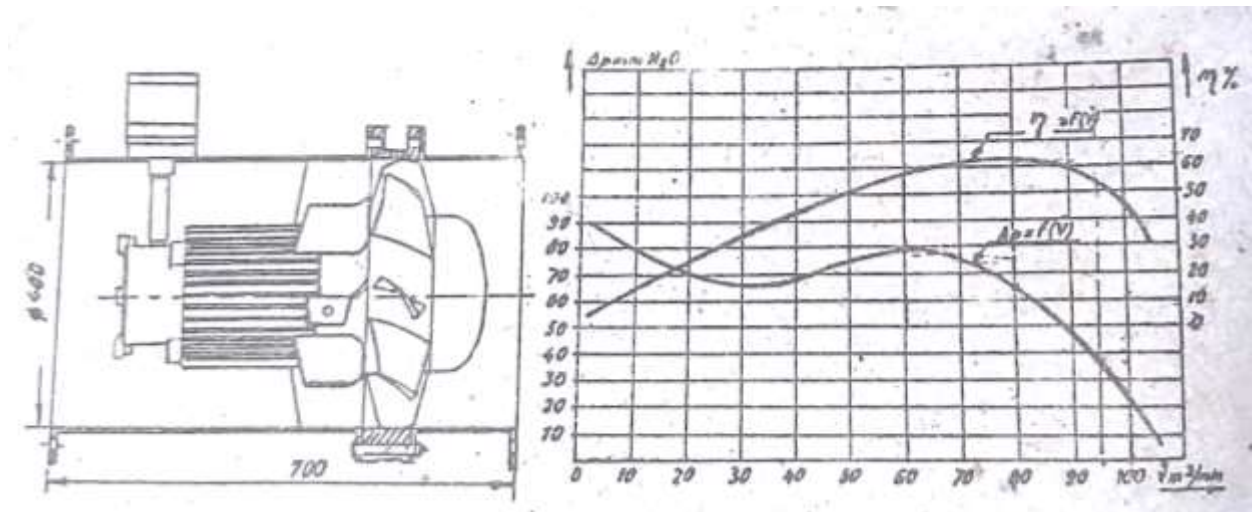
- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de analizar el comportamiento de la asociación de ventiladores en paralelo y en serie
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de la asociación de ventiladores en paralelo y en serie.

III. Procedimientos

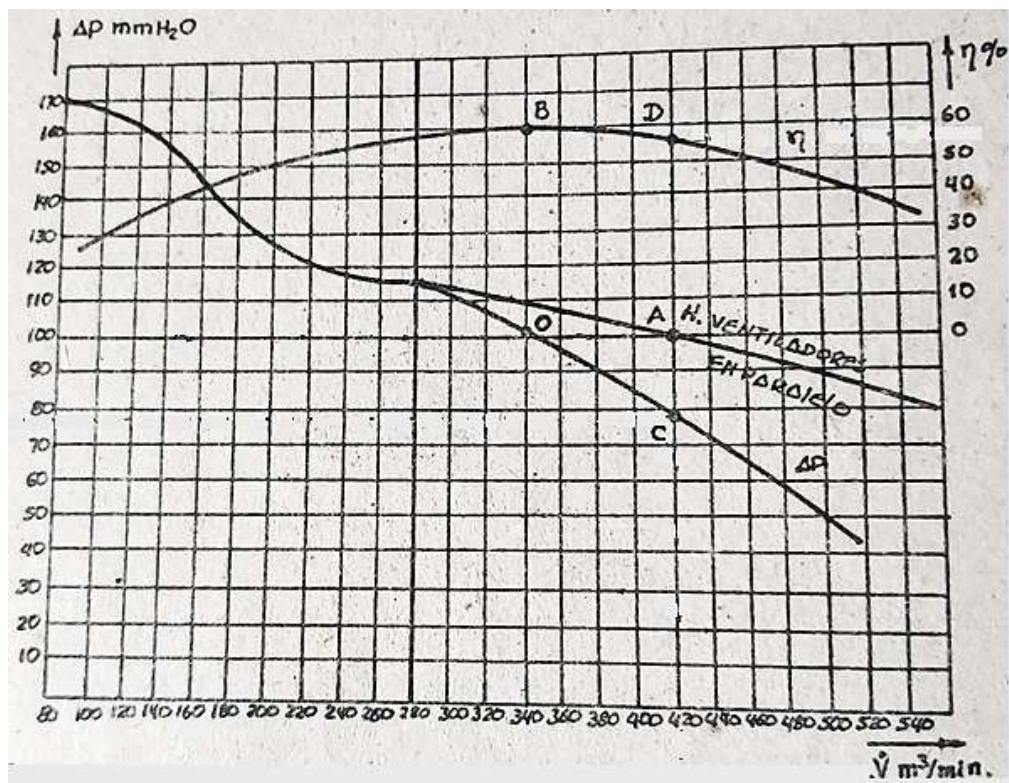
1. La figura nos muestra las curvas características de un ventilador axial utilizado en la ventilación de minas. Se tiene un sistema de ventilación en el cual operan dos ventiladores instalados en paralelo; ambos ventiladores son iguales. Por cuestiones de servicio se hace funcionar primero un ventilador, de manera que en el punto de operación la pérdida en el sistema es de $35\text{mm de } H_2O$ y el caudal de $95\text{m}^3/\text{min}$.

Determinar:

- a) La ecuación del sistema
- b) La pérdida en el sistema y el caudal cuando operan ambos ventiladores.
- c) La potencia total consumida por los dos ventiladores.
- d) ¿Dentro de qué rango se encuentra el valor de grado de reacción?



2. La figura nos muestra las curvas características de un ventilador axial. Si se instala en un sistema de ventilación 2 unidades en paralelo con una pérdida de 100mm de agua, determine:
- El caudal cuando ambas unidades trabajan en paralelo
 - La potencia de accionamiento de cada ventilador
 - El caudal cuando opera un solo ventilador





Segunda unidad

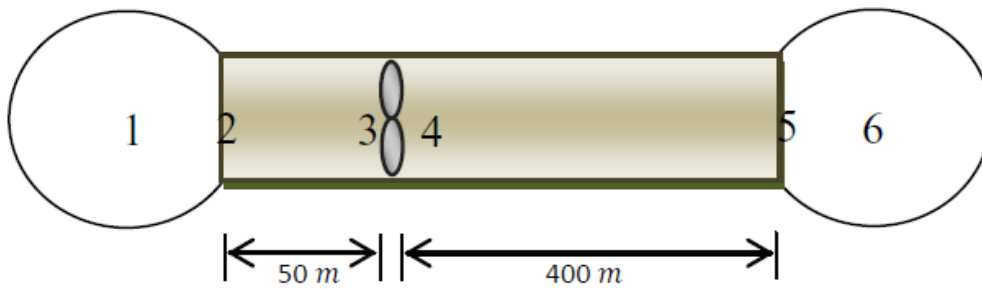
Semana 8

Ventiladores axiales

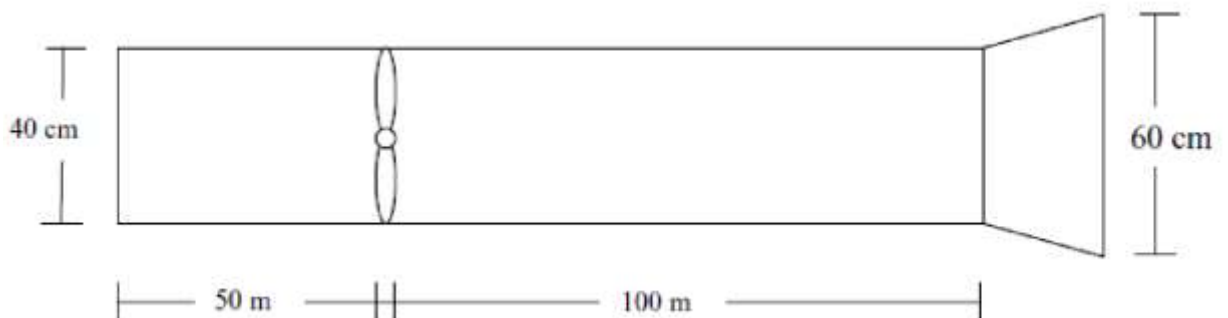
Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 2	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de analizar parámetros de diseño de los ventiladores centrífugos y axiales.
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de ventiladores centrífugos y axiales.
- III. **Procedimientos**
 1. En un sistema de ventilación se requiere movilizar un caudal de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ de aire, la longitud del ducto de entrada es 50 m y la longitud del ducto de salida 400 m , ambas de sección rectangular e igual área ($45 \times 35 \text{ cm}^2$), el rendimiento total es 70%, el coeficiente de fricción de Darcy en los ductos de entrada y salida se estima igual a 0.01. a) Dibujar los diagramas de presión estática y total. b) Calcular la potencia mecánica del ventilador que se necesita ($P_{atm} = 101.35 \text{ KPa}$, $T_{aire} = 20^\circ\text{C}$, $R = 287 \text{ J/Kg K}$).



2. Un ventilador debe impulsar $2 \text{ m}^3/\text{s}$ de aire, las pérdidas secundarias se pueden estimar usando el método de longitud equivalente con un valor de $L_{eqE} = 25 \text{ m}$ (Entrada al ducto) y $L_{eqD} = 25 \text{ m}$ (en el difusor de salida). El ducto se puede considerar liso y el coeficiente de fricción se calcula usando la ecuación de Blasius $f = 0.316/Re_D^{1/4}$. Trace los diagramas de distribución de presión estática y total, calcule la altura del ventilador y la potencia mecánica si la eficiencia global es 82%.





Tercera unidad

Semana 9

Centrales hidroeléctricas y turbinas hidráulicas

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 3	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de analizar las centrales hidroeléctricas y turbinas hidráulicas
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de centrales hidroeléctricas y turbinas hidráulicas
- III. **Procedimientos**
 1. Una turbina de reacción tiene las siguientes características $D_1 = 750mm$; $D_2 = 630mm$; $n = 400rpm$; $\alpha_1 = 15^\circ$; $C_1 = 14m/s$; $C_{2m} = 5m/s$; $C_{2u} = 0$; $b_1/D_1 = 0.15$; $\eta = 0.8$; la entrada en la turbina se encuentra 4m por encima del nivel superior del agua en el canal de salida; la velocidad del agua en la tubería de entrada es 2 m/s; se pierden en rozamientos mecánicos 3.7 kW (*supóngase* $\tau_1 = 1$; $c_s = 0$; $\nu = 1$). Calcular:
 - a) los triángulos de velocidad a la entrada y salida de la turbina
 - b) el caudal.
 - c) La altura útil.
 - d) El salto neto
 - e) La presión relativa a la entrada en la turbina
 - f) Potencia útil suministrada por la turbina



2. Una turbina Francis gira a 600 rpm y en ella entra un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Los diámetros de entrada y salida son de 1 m y $0,45 \text{ m}$ respectivamente, y las secciones entre álabes correspondientes de $0,14 \text{ m}^2$ y $0,09 \text{ m}^2$. El ángulo de salida del agua del distribuidor es de 12° , el ángulo de salida de la rueda $\beta_2 = 45^\circ$ y el rendimiento manométrico de la turbina del 78%. Determinar
- El salto neto
 - El par y la potencia sobre el eje
3. Una turbina Francis está conectada en acoplamiento directo a un alternador de 11 pares de polos. En su punto de funcionamiento se tiene: $H_n = 45 \text{ m}$; $N = 3660 \text{ kW}$; $\eta = 89\%$; $\eta_{mec} = 98,4\%$; $\eta_{vol} = 1$. Si se considera que el plano de comparación coincide con el nivel inferior del agua, aguas abajo, la entrada en el rodete se encuentra a $2,1 \text{ m}$ y la salida del mismo a $1,8 \text{ m}$. El rodete tiene un diámetro $D_1 = 1,55 \text{ m}$. Las presiones a la entrada y salida del rodete son: $23,5 \text{ m. c. a.}$ y $(-2,5) \text{ m. c. a.}$ respectivamente. El agua sale del rodete con $\alpha_2 = 90^\circ$, siendo constante la velocidad del flujo en todo el rodete, $c_{1m} = c_{2m}$. Las velocidades a la entrada y salida del tubo de aspiración son: $c_2 = 6 \text{ m/s}$ y $c_2' = 1 \text{ m/s}$, respectivamente. Pérdidas en la tubería, despreciables. Determinar:
- Angulo β_1 de los álabes del rodete a la entrada
 - Caudal y diámetro de salida del tubo de aspiración
 - Nº específico de revoluciones
 - Pérdidas en el rodete h_r , y en el distribuidor h_d
 - Pérdidas en el tubo de aspiración h_s y h_s'
 - Altura del tubo de aspiración; rendimiento



Tercera unidad

Semana 10

Turbinas de acción

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 3	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

I. Propósito: El estudiante será capaz de analizar las turbinas de acción

II. Descripción de la actividad a realizar

Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de las turbinas de acción.

III. Procedimientos

- Una turbina Pelton trabaja bajo una altura neta de $240m$; $c_1 = 0.98\sqrt{2gH}$. El diámetro del chorro es de $150mm$ y el rodete de $1.800mm$; $\alpha_1 = 0^\circ$, $\beta_2 = 15^\circ$, $w_2 = 0.70w_1$ y $u_1 = 0.45c_1$. Calcular:
 - La fuerza tangencial ejercida por el chorro sobre las cucharas
 - La potencia transmitida por el agua al rodete
 - Rendimiento hidráulico de la turbina
 - El rendimiento total de la turbina, si el rendimiento mecánico es de 0.97
- Para explotar un salto de $300 m$ de altura bruta y $0,5 m^3/s$ de caudal, se desea utilizar una turbina Pelton de un solo inyector. Las pérdidas de carga en la tubería forzada pueden estimarse en un 2% de la altura bruta, y para los cálculos de altura neta se tomará como salida de la turbina el nivel del canal de desagüe. Los diámetros de la rueda y de la tobera del inyector son respectivamente $0,5 m$ y $92,2 mm$. Se estima que las pérdidas en



las cucharas ascienden al 10% de la energía cinética relativa a la entrada de ellas ($H_{r_{1-2}} = 0.1 \frac{w_1^2}{2g}$) y que el rendimiento mecánico es del 94%, incluyendo las pérdidas por rozamiento de disco y ventilación. La turbina arrastrará a un alternador de 2 pares de polos y se instalará con eje vertical, estando la salida del inyector, la entrada a la turbina, y la zona de intercambio de energía entre el fluido y el rodete, en el mismo plano, situado a 2 metros sobre el nivel del canal aguas abajo. $\beta_2 = 10^\circ$. Determine:

- Los triángulos de velocidades a la entrada y salida.
- Las alturas de Euler y neta.
- El rendimiento hidráulico, los rendimientos total de la turbina y total de la instalación.
- Las pérdidas en el inyector.
- La potencia en el eje.

3. La placa de características de una turbina Pelton de eje vertical nos muestra los siguientes datos: caudal $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$; presión en la brida de entrada $P_e = 682 \text{ mca}$; potencia en el eje $P_a = 6000 \text{ kW}$; velocidad de rotación $n = 1000 \text{ rpm}$ ($f = 50 \text{ Hz}$). En la instalación se han medido las siguientes dimensiones: $Z_e = Z_1 = 5 \text{ m}$, considerando $z = 0$ en la superficie del canal aguas abajo; diámetro de la tubería forzada en la brida de entrada a la turbina, $D_e = 750 \text{ mm}$; diámetro de la rueda en la circunferencia tangente al eje del inyector, $D = 1065 \text{ mm}$; diámetro del inyector en su apertura máxima, $d = 105,5 \text{ mm}$; $\beta_2 = 10^\circ$. Considerando la sección de salida de la turbina (s) está situada en la superficie del agua en el canal de desagüe; que se pueden estimar $\eta_v = 1$ y $\eta_{mec} = 0.96$ (incluidas las pérdidas por rozamiento de disco y ventilación), y que el inyector está trabajando con máxima apertura en las condiciones indicadas en la placa de características. Determine:

- La altura neta.
- El rendimiento hidráulico (η_h) de la turbina.
- La altura de Euler (H_u).
- Las pérdidas hidráulicas en el inyector (H_{e-1}).
- Las pérdidas hidráulicas en las cucharas (H_{1-2}).



Tercera unidad

Semana 11

Turbinas de reacción

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 3	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

I. **Propósito:** El estudiante será capaz de analizar las turbinas de reacción

II. **Descripción de la actividad a realizar**

Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de las turbinas de reacción.

III. **Procedimientos**

1. Para una turbina Kaplan instalada en una central hidroeléctrica, como se muestra en la figura, donde los datos en el punto de diseño son los siguientes: La altura/salto neto $H = 17.5m$, el caudal a la entrada $Q = 478m^3/s$, $n = 68.2rpm$ y la potencia de accionamiento $P_a = 10^5 CV$. Las dimensiones del rodete son: $D = 8.4m$ y el diámetro del cubo es de $3.4m$. La velocidad absoluta de salida del rodete se prevé para estas condiciones de funcionamiento paralela al eje de giro y el rendimiento hidráulico estimado es $\eta_h = 0.944$. Considérese $\eta_v = 1$.
 - a. Calcular los ángulos de velocidades a la entrada y salida del rodete en los tres puntos siguientes: en el extremo del álabe ($D_{ext} = D = 8.4m$), en el interior del álabe ($D_{int} = 3.4m$) y en el diámetro medio del álabe D_m
 - b. Los álabes directrices tienen una inclinación tal que obligan al flujo a salir del distribuidor formando 38° con el radio. Si el diámetro a la salida del distribuidor es $D_{1'} = 9.2m$, calcular la velocidad de salida del distribuidor $c_{1'}$, y la altura del álabe.

- c. Calcular la energía entregada por el flujo al rodete, la parte de ella entregada en forma de energía cinética y el grado de reacción.
- d. Potencia disipada por pérdidas mecánicas. Rendimiento total.
- e. Calcular la velocidad específica n_s .

	$1'$	salida de la corona directriz	e	exterior del álabe
Nomenclatura:	1	entrada rodete	m	media del álabe
	2	salida rodete	i	interior del álabe

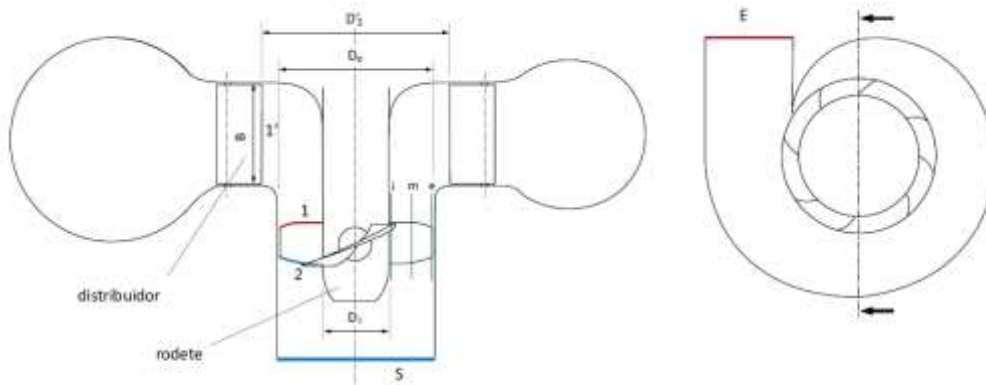


Figura 1 : Sección meridional y transversal de una turbina Kaplan.

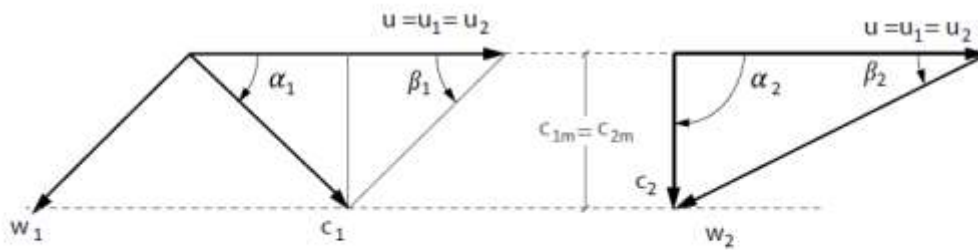


Figura 2 : Triángulos de velocidades de entrada y salida a una distancia r .

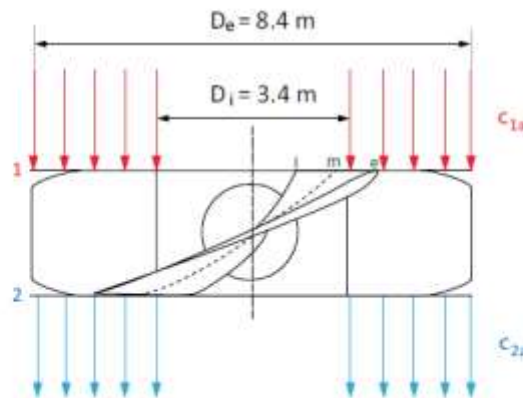


Figura 3 : Componente axial de la velocidad en las secciones 1 y 2.

3. Una turbina Francis de eje vertical está instalada en una central hidroeléctrica que tiene una altura neta de 82 m y está acoplada a un alternador que ha de girar a 500 rpm ($f = 50 \text{ Hz}$). La turbina desarrolla una potencia en el eje (P_a) de $8,5 \text{ MW}$ y consume un caudal de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando trabaja en su punto de diseño (entrada sin choque en el rodete y salida radial, $c_{2u} = 0$), estimándose en estas condiciones $\nu = 0,95$ y $\eta_{mec} = 0,98$. En el rodete de la turbina se han medido las siguientes dimensiones:

Diámetro de entrada, $D_1 = 1,5 \text{ m}$

Ancho de entrada, $b_1 = 0,25 \text{ m}$

Diámetro de salida, $D_2 = 1 \text{ m}$

Ancho de salida, $b_2 = 0,5 \text{ m}$

Coeficientes de obstrucción en entrada y salida $\tau_1 = \tau_2 = 0,98$.

La turbina tiene tubo de aspiración y está instalada con las siguientes cotas geodésicas, referidas al nivel del canal aguas abajo, en donde se considera la salida de la turbina:

Entrada en la turbina, $Z_e = 2,5 \text{ m}$

Entrada en el rodete, $Z_1 = 2,5 \text{ m}$



Salida del rodete, $Z_2 = 2 \text{ m}$

En la misma salida del rodete se tomará la entrada del tubo de aspiración y se considera que, para el caudal nominal, las pérdidas en éste (H_{2-s}) son doble de las que se producen en el rodete (H_{1-2}), las que a su vez son iguales a las que se producen desde la entrada a la turbina hasta la entrada al rodete (H_{e-1}), es decir: $H_{2-s} = 2 H_{1-2} = 2 H_{e-1}$.

Determine para el funcionamiento en las condiciones de diseño:

- La altura de Euler.
- Los triángulos de velocidades en entrada y salida del rodete.
- Las presiones en la entrada y salida del rodete (entrada del tubo de aspiración).

4. Una turbina Francis está trabajando en un salto cuya altura neta es de 94 m . Considerando la salida en el nivel del canal aguas abajo, cuya velocidad puede despreciarse, se han estimado los siguientes valores de pérdidas:

$2,1 \text{ m}$ entre la entrada a la turbina y la entrada al rodete (H_{e-1}).

$3,6 \text{ m}$ entre la entrada al rodete y la salida de éste (H_{1-2}).

$0,5 \text{ m}$ entre la salida del rodete y la salida de la turbina (H_{2-z}).

Además, es conocido que gira a 600 rpm , el diámetro del rodete a la entrada es $D_1 = 0,8 \text{ m}$, su ancho en esta misma sección $b_1 = 0,08 \text{ m}$ con un coeficiente de obstrucción $\tau_1 = 0,95$, el diámetro del rodete a la salida es de $D_2 = 0,3 \text{ m}$, rendimiento volumétrico $\eta_v = 0,93$ y rendimiento mecánico $\eta_m = 0,95$.

Considerando que la entrada al tubo de aspiración es la salida del rodete y que el fluido sale de éste con $c_{2u} = 0$, que la velocidad meridional en el rodete se mantiene constante entre la entrada y la salida de éste y de valor $c_{1m} = c_{2m} = 8 \text{ m/s}$ y siendo la velocidad del agua al abandonar el tubo de aspiración igual a $1,5 \text{ m/s}$. Determine:

- El rendimiento hidráulico.
- El caudal, el rendimiento total y la potencia de accionamiento.
- Los triángulos de velocidades en la entrada y salida del rodete.
- La diferencia de alturas piezométricas entre la entrada y la salida del rodete.



- e) Las pérdidas en el tubo de aspiración (excluyendo la de velocidad de salida).
- f) Presiones a la entrada y salida del rodete si sus respectivas cotas geodésicas son $Z_1 = 3 \text{ m}$ y $Z_2 = 2,5 \text{ m}$.



Tercera unidad

Semana 12

Semejanza hidráulica

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 3	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de aplicar la semejanza hidráulica en las turbomáquinas.
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de semejanza hidráulica.
- III. **Procedimientos**

1. En el ensayo de una turbina Francis se obtuvieron los resultados en el punto de óptimo rendimiento. $H = 5\text{ m}$; $Q = 1,5\text{ m}^3/\text{s}$; $n = 200\text{ rpm}$; $P_a = 55\text{ KW}$; $D_1 = 750\text{ mm}$; calcule:
 - a) El rendimiento y el número de revoluciones específico de esta turbina
 - b) n , Q y P_a si esta turbina se instala en otra central bajo un salto neto de $H = 15\text{ m}$.
2. Una turbina Pelton trabaja con los siguientes datos:

$$H = 480\text{ m}; Q = 2,8 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}; n = 360\text{ rpm}; \eta = 0,82; f = 60\text{ Hz}; D = 2,10\text{ m}$$

Determine Q , n y P_a para otra turbina Pelton de la misma fábrica pero que tiene un diámetro de 250 mm y una carga de 600 m , de manera que trabaje en condiciones



semejantes a la primera. Si es necesario ajuste el diámetro para obtener un valor factible de n .

3. Se dispone de un aprovechamiento hidráulico con caudal constante en una corriente que fluye a 750 litros/s ; utiliza un salto neto $H = 24 \text{ m}$ con un grupo turboalternador en acoplamiento directo de 7 pares de polos, siendo el rendimiento global de la instalación del 86%, y absorbiendo el referido grupo la aportación diaria del caudal citado durante $4,5 \text{ horas}$ ininterrumpidamente, a caudal constante.

Con el fin de incrementar la potencia del aprovechamiento hidráulico se incrementa el salto neto utilizado, y se acopla a la misma turbina otro alternador de 6 pares de polos que sustituye al primero.

Suponiendo que el rendimiento global no se modifica, se pide:

- La potencia en CV del primer grupo, y el caudal.
 - El salto neto a utilizar en el nuevo grupo y nueva potencia.
 - El número de horas ininterrumpidas de funcionamiento a caudal constante del nuevo grupo.
 - La capacidad de regulación del embalse que necesita el nuevo grupo.
4. Para un proyecto hidroeléctrico se tiene la siguiente información:
- $H = 85 \text{ m}$; $P_a = 135 \text{ MW}$, $f = 60 \text{ Hz}$; $p = 22$; $\text{altitud} = 680 \text{ msnm}$; $\text{Temperatura del agua} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Determine:
- El número y tipo de unidades a instalarse.
 - La altura de aspiración, H_s
 - Si se coloca una unidad adicional ¿Cuál sería el tipo conveniente y la nueva H_s ?



Cuarta unidad

Semana 13

Turbinas a vapor

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 4	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

I. Propósito: El estudiante será capaz de analizar las turbinas a vapor

II. Descripción de la actividad a realizar

Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de las turbinas a vapor.

III. Procedimientos

1. De un escalonamiento de una turbina axial se conocen los triángulos de velocidades de entrada y salida al rotor, que están definidos a partir de los siguientes datos:

-Velocidad axial constante

-Velocidad absoluta de salida de 75m/s en dirección axial

-Ángulo de entrada al rotor $\alpha_1 = 68^\circ$

-Velocidad periférica $u = 185,6\text{ m/s}$

-Coeficiente de pérdida de velocidad en el estator $E = 0.0694$

-Coeficiente de pérdida de velocidad en el rotor $R = 0.0694$

Determinar:

a) Velocidad absoluta de entrada al rotor c_1



- b) Coeficiente de flujo
- c) Rendimiento total a estático, suponiendo que se pierde la velocidad de salida del escalonamiento
- d) Representar en un diagrama $h - s$ la evolución del fluido en el escalonamiento y las pérdidas incluidas en el rendimiento total a estática.

2. De un escalonamiento de turbina axial se conocen los datos siguientes a la altura media del álabe:

-Velocidad periférica $300m/s$

-Velocidad absoluta de entrada al rotor $660m/s$

-Velocidad absoluta de salida del rotor en dirección axial

-Se mantiene la componente axial de la velocidad, cuyo valor es: $275m/s$

-Escalonamiento de repetición: salida de rotor=entrada estator y viceversa

- a) De qué tipo de escalonamiento se trata
- b) Trabajo específico del escalonamiento
- c) Representar en un diagrama $h - s$ la evolución del fluido y las diferentes pérdidas
- d) Calcular los coeficientes de pérdidas en perfil, anulares y secundarias en rotor y en estator a través de las siguientes expresiones:

$$\sigma_{optima} = \frac{2}{0.8} \cos^2 \beta_2 (tg \beta_2 - tg \beta_1)$$

$$p = 0.025 \left(1 + \left(\frac{\varepsilon}{90} \right)^2 \right)^2$$

$$a_s = p \cdot 3,2 \cdot \sigma_{opt} \cdot \frac{s}{H}$$

- e) Calcular el rendimiento periférico del escalonamiento a partir de las distintas pérdidas, considerando que se pierde la energía cinética de salida.

Datos adicionales: $\frac{s}{H} = 0.2$



3. Un escalamiento intermedio de una turbina axial, se diseña con los siguientes parámetros en el diámetro medio del rotor:
- Grado de reacción: 0.3
 - Ángulo de salida del estator $\alpha_1 = 68^\circ$
 - Ángulo de salida del escalonamiento $\alpha_2 = -10^\circ$
 - Velocidad periférica: 308m/s
 - Componente axial de la velocidad constante en el escalamiento
- Determinar:
- a) La componente axial de la velocidad a partir de la expresión del grado de reacción en función de las componentes de velocidad
 - b) Trabajo específico desarrollado por dicho escalonamiento
 - c) Velocidad absoluta del fluido a la entrada del escalonamiento
 - d) Coeficiente de carga y coeficiente de flujo



Cuarta unidad

Semana 14

Turbinas a gas

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 4	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

I. Propósito: El estudiante será capaz de analizar las turbinas a gas

II. Descripción de la actividad a realizar

Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de las turbinas a gas.

III. Procedimientos

1. Una turbina de gas que gira a 10.300 rpm, está compuesta por dos escalonamientos de acción de presión constante en el rotor. Se conocen los datos siguientes:

-Condiciones del fluido a la entrada de la turbina: 7.8 bar, 800°C y 100m/s

-Relación de expansión de la turbina: $P_0/P_{2SS} = 8,3$

-Rendimiento del primer escalonamiento (criterio total a estática): 0,7962

-Potencia que desarrolla la turbina: 10,52MW

-Gasto másico: 25,25 kg/s

-La energía cinética de salida del primer escalonamiento se pierde.

-Ambos escalonamientos contribuyen por igual a la potencia desarrollada



-Considerar que el fluido que evoluciona por la turbina se comporta como un gas perfecto con $C_p = 1,147 \text{ kJ/kg K}$ y $\gamma = 1,33$

Calcular:

- a) Presión estática de salida del estator del primer escalonamiento
- b) Rendimiento total a estática de la turbina

2. De una turbina de gas para accionamiento mecánico se conocen los siguientes datos:

-Gasto másico: $21,2 \text{ kg/s}$

-Régimen de giro: $7\,950 \text{ min}^{-1}$

-Temperatura de parada a la entrada de la turbina: 910°C

-Temperatura de parada a la salida de la turbina: 486°C

La turbina está formada por dos escalonamientos de acción y se supone que ambos desarrollan el mismo trabajo.

Se estiman los siguientes datos para el primero de los escalonamientos:

-Escalaonamiento de acción de presión constante en el rotor: 2.9 bar

-Velocidad periférica a la altura media del álabe: 348 m/s

-Se supone que no hay pérdidas de velocidad ni en el estator ni el rotor

-Se mantiene la velocidad axial constante

-Relación de expansión del escalaonamiento $\frac{P_{00}}{P_1} = 2,4$

-Considerar que el fluido que evoluciona por la turbina es un gas perfecto con: $C_p = 1,147 \text{ kJ/kgK}$ y $\gamma = 1,33$

Se pide:

- a) Diámetro del rotor a la altura media del álabe en el primer escalaonamiento
- b) Potencia de la instalación si el factor de potencia es 0,39
- c) Trabajo específico de cada escalaonamiento
- d) Pérdida por velocidad de salida del primer escalaonamiento
- e) Forma de los triángulos de velocidades asociados al rotor
- f) Altura de los álbes de la corona de rotor del primer escalaonamiento



3. Una turbina de gas desarrolla una potencia neta de 118,2 MW. Se conocen además los siguientes datos de la instalación:

- Factor de potencia o practicabilidad: $W_u/W_T = 0,45$
- Relación de expansión (presiones de parada): 12,3:1
- Temperatura de parada a la entrada de la turbina: 1150°C
- Temperatura de parada a la salida de la turbina: 584,7°C
- Gasto másico que circula por la turbina: 405 kg/s
- Número de escalonamientos de la turbina: 3
- Se supone que el salto se reparte por igual entre los tres escalonamientos
- Rendimiento mecánico: 1

Características de los escalonamientos de la turbina:

- Grado de reacción: 0,5
- Velocidad axial constante
- Coeficiente de carga: $\Psi = 2$
- Los gases salen del escalonamiento con velocidad absoluta $c_2 = 256,75 \text{ m/s}$ y dirección $\alpha_2 = -39,8^\circ$
- Correlación de Carter para la desviación: $\delta = 0,19 \frac{\theta}{1,15}$
- Tener en cuenta que: $\varepsilon = \theta + i - \delta$

Se pide:

- Trabajo que desarrolla la turbina y trabajo que absorbe el compresor
- Rendimiento del conjunto de los tres escalonamientos de la turbina
- Forma de los triángulos de velocidades asociados al rotor de la turbina
- Calcular la deflexión que experimenta el fluido en el rotor y la curvatura que deberán tener los álabes si el ángulo de incidencia es 0°

Datos adicionales: $\gamma = 1,33$ y $C_p = 1,147 \text{ kJ/kgK}$



Cuarta unidad

Semana 15

Compresores

Sección:	Apellidos :
Docente :	Nombres :
Unidad : Unidad 4	Fecha:/...../..... Duración: 60 min

Instrucciones: Se sugiere revisar la teoría presentada por el docente durante la sesión de clase, para facilitar la resolución de los problemas presentados.

- I. **Propósito:** El estudiante será capaz de analizar los parámetros de cálculo de los compresores axiales y centrífugos
- II. **Descripción de la actividad a realizar**
Resolver los problemas mostrados, tomando en cuenta el marco teórico de compresores axiales y centrífugos.
- III. **Procedimientos**
 1. Un escalonamiento de un compresor de flujo axial se ha diseñado con un grado de reacción de 0,5 a la altura media del álabe. Se conocen además los siguientes datos:
 - Velocidad periférica en $H/2$: $275m/s$
 - Ángulo a_1 de entrada al rotor: $28,75^\circ$
 - Radio correspondiente a la altura media del álabe: $0.275m$
 - Altura del álabe representativa del primer escalonamiento: $0,1833m$
 - Velocidad absoluta de entrada al rotor en $H/2$: $156,83m/s$
 - Se conserva la componente axial de la velocidad en $H/2$
 - Los álabes están torsionados a partir de la Ley ExponencialCalcular:
 - a) Constantes de la ley torsional exponencial



- b) Trabajo específico absorbido por el escalonamiento en la raíz y en el radio medio
- c) Analizar cómo se modifica el diagrama de velocidades del rotor del radio medio a la raíz calculando $c_{u1r'}$, $c_{u2r'}$, $c_{a1r'}$, $c_{a2r'}$
2. Un turbohélice está equipado con un turbocompresor centrífugo que tiene las siguientes características
- El aire entra axialmente a la sección de entrada con una velocidad de $137m/s$, siendo los radios interior y exterior de dicha sección $40mm$ y $149mm$ respectivamente
 - Álabes curvados hacia atrás ($\beta_2 = 30^\circ$) con radio de salida del rodete de $300mm$
 - Velocidad de giro $15\ 050min^{-1}$
 - Rendimiento isentrópico $0,83$
 - Se mantiene la componente meridiana de velocidad en el rotor
 - El avión donde está instalado dicho motor vuela a una velocidad de $200m/s$ en una zona de la atmósfera donde las condiciones ambientales son: $260K$ y $0,6bar$
 - Considerar que no existen pérdidas de carga ni de calor (evoluciones isentrópicas) en la toma dinámica y en el difusor
 - El aire se supone que se comporta como un gas ideal con $\gamma = 1,4$ y $C_p = 1,005kJ/kgK$
 - Número de álabes del rodete: 20
 - Expresión para el factor de deslizamiento: $\sigma = 1 - \frac{0,63\pi}{Z_r}$
- Se pide:
- a) Representar los triángulos de entrada y salida del rotor y calcular u_1 , c_{u1} , u_2 , c_{u2}
- b) Trabajo específico absorbido por el escalonamiento
- c) Evolución termodinámica del fluido en la toma dinámica y en el escalonamiento de compresor
- d) Condiciones de presión y temperatura de parada a la entrada al compresor
- e) Relación de compresión del compresor
3. De un compresor centrífugo de álabes radiales de un único escalonamiento se conocen los datos siguientes:



- Sección de entrada al rodete: *Radio de cabeza = 14cm, Radio de raíz = 6cm*
- Radio de salida del rodete: *21cm*
- Gasto másico de aire: *8kg/s*
- Velocidad de giro: *16 000min⁻¹*
- Factor de deslizamiento: *0,87*
- Condiciones estáticas de admisión: *94 kPa y 293K*
- Presión estática a la salida del rotor: *1,44bar*
- Ángulo de prerrotación: *$\alpha_1 = 10^\circ$*
- Suponer que el aire se comporta como un gas perfecto con *$C_p = 1,005kJ/kgK$ y $\gamma = 1,4$*

Se pide calcular:

- a) Triángulos de velocidades de entrada al rotor en raíz y cabeza
- b) Número de Mach relativo de entrada al rotor en cabeza
- c) Potencia de accionamiento del compresor
- d) Relación de compresión del compresor, si el rendimiento del mismo es 0,8
- d) Si se mantiene la componente meridiana de la velocidad, ¿cuál será la altura de los álabes a la salida del rotor?



Lista de referencias

Básica:

Dixon, S. y Hall, C. (2014). Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery. (7.a ed.). Elsevier. <https://cutt.ly/IWVQetc>

Mataix, C. (2009). Turbomáquinas hidráulicas. Universidad Pontificia Comillas. <https://cutt.ly/1WVQnuY>

Complementaria:

Mataix, C. (2015). Turbomáquinas Hidráulicas. Editorial ICAI.

Hassan, B. & Wael, A. (2015). Pumping machinery theory and practice. Editorial Wiley.

Seppo, K. (2011). Principles of Turbomachinery. Editorial Wiley

Viejo, M. (2014). Bombas: teoría, diseño y aplicaciones. Editorial Limusa.