

UNIVERSIDAD NACIONAL HERMILIO VALDIZÁN

ESCUELA DE POSGRADO



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DIFUSOR DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN: CIENCIAS

MENCIÓN AUDITORÍA DE SISTEMAS INTEGRADOS DE GESTION DE SEGURIDAD,
MEDIO AMBIENTE, CALIDAD Y RESPONSABILIDAD SOCIAL

ITURRARAN URQUIZA, Luís Fernando

HUÁNUCO – PERÚ

2015

UNIVERSIDAD NACIONAL HERMILIO VALDIZÁN

ESCUELA DE POSGRADO



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DIFUSOR DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN: CIENCIAS

MENCIÓN AUDITORÍA DE SISTEMAS INTEGRADOS DE GESTION DE SEGURIDAD, MEDIO AMBIENTE, CALIDAD Y RESPONSABILIDAD SOCIAL

ITURRARAN URQUIZA, Luís Fernando

HUÁNUCO – PERÚ

2015

RESUMEN

Las turbinas hidrocinéticas convierten la energía cinética de un río en movimiento o mareas de agua en energía eléctrica. En este trabajo, se discutieron consideraciones de diseño de turbinas de corriente de río con énfasis en los rotores de hoja recta de Darrieus. Fue llevado a cabo un análisis de dinámica de fluidos para predecir el desempeño del rotor. También son presentadas discusiones sobre un amplio rango de condiciones físicas y operacionales que pueden impactar el escenario de diseño. Además, un procedimiento de diseño sistemático junto con información de apoyo que ayudaría en la decisión de varios pasos de manufactura son bosquejados e ilustrados por un ejemplo de diseño. Finalmente, el ámbito para un posterior trabajo es resaltado.

SUMMARY

Hydrokinetic turbines convert kinetic energy of moving river or tide water into electrical energy. In this work, design considerations of river current turbines are discussed with emphasis on straight bladed Darrieus rotors. Fluid dynamic analysis is carried out to predict the performance of the rotor. Discussions on a broad range of physical and operational conditions that may impact the design scenario are also presented. In addition, a systematic design procedure along with supporting information that would aid various decision making steps are outlined and illustrated by a design example. Finally, the scope for further work is highlighted

INTRODUCCIÓN

Entre los distintos tipos de turbinas de viento de eje vertical e hidrocinéticas, la configuración del rotor Darrieus ha ganado mucha atención debido a sus características de rendimiento único, operacionales y de diseño. El inventor francés GJ M Darrieus patentó este concepto en 1931 con la Oficina de Patentes de Estados Unidos, que emplea un conjunto de hojas curvas que se aproximan a la forma de un cable perfectamente flexibles, es decir, la forma Troposkien. Posteriormente diseños de eje vertical que comprenden hojas rectas aparecieron bajo nombres tales como 'H-Darrieus' o turbinas 'de jaula de ardilla Darrieus' [1], [2].

Aunque se estudiaron la mayoría de turbinas de eje vertical para la conversión de la energía eólica, estos conceptos pueden ser igualmente usados en aplicaciones hidráulicas. Las River Current Turbines (ECA) y los convertidores de energía de las mareas, son ejemplos de este tipo de turbinas hidrocinéticas donde la energía cinética del agua en movimiento se convierte en formas útiles de energía eléctrica o mecánica. Los esfuerzos de investigación en este campo de la ingeniería de la energía, especialmente en la tecnología de turbinas de río actual, son más bien escasos y la base de conocimientos es bastante deficiente.

En este trabajo, el análisis y modelado de tubo de corriente de esta turbina se lleva a cabo con vistas a poner énfasis en su rendimiento. A medida que avanza el foco principal de esta tesis, se presentan diversas consideraciones de diseño basadas en una serie de criterios generales, así como los factores de dinámica de fluidos. La información disponible en el viento, las mareas, y la in-

genería energética de río ha sido utilizada para formular la comprensión de diversas cuestiones subyacentes.

ÍNDICE

Capítulo 1:El problema de investigación.....	1
1.1.- Descripción del problema.....	1
1.2.- Formulación del problema.....	3
1.2.1.- Problema general.....	3
1.2.2.- Problemas específicos.....	3
1.2.3.- Objetivo general y Objetivos específicos.....	3
1.2.4.- Hipótesis.....	3
1.2.5.- Variables.....	4
1.2.6.- Justificación e importancia.....	4
1.2.7.- Viabilidad.....	5
1.2.8.- Limitaciones.....	5
Capítulo 2: Materiales y métodos.....	6
2.1.- Materiales.....	6
2.2.- Definiciones conceptuales.....	6
2.3.- Métodos.....	7
2.4.- Tipo de investigación.....	7
2.5.- Diseño y esquema de la investigación.....	7
2.6.- Población y muestra.....	7
2.7.- Instrumentos de recolección de datos.....	8
2.8.- Técnicas de recojo, procesamiento y presentación de datos.....	8
Capítulo 3: Resultados.....	10
3.1.- Consideraciones para el análisis dinámico del fluido.....	10
3.2.- Diseño del rotor de hoja recta de Darrieus.....	21
3.2.1.- Dimensionamiento básico.....	21

3.2.2.- Diseño del rotor y difusor.....	25
Capítulo 4:Discusión de resultados.....	28
Conclusiones.....	30
Sugerencias.....	31
Bibliografía.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes del sistema de turbina.....	10
Figura 2: Desempeño de varios rotores.....	12
Figura 3: Distribución de presión y velocidad alrededor de una turbina.....	13
Figura 4: Interacción pala (hoja) - flujo.....	14
Figura 5: Datos típicos de superficie de sustentación (NACA 63-018).....	17
Figura 6: Datos modificados de superficie de sustentación.....	19
Figura 7: Gráfica de desempeño de una turbina de Darrieus.....	20
Figura 8: (a) Variaciones de la densidad del agua (b) Curvas de velocidad dura- ción y clasificación de recursos.....	22

CAPÍTULO 1: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.- Descripción del problema

En el primer Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de Naciones Unidas, que es la principal fuente de asesoramiento científico en este asunto, confirmó que la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) está produciendo un severo cambio en nuestro clima.

El cambio climático significa un grave aumento del riesgo de sufrir hambrunas para decenas de millones de personas, la posibilidad de padecer enfermedades como la malaria para cientos de millones, y la amenaza de ser afectados por inundaciones y escasez de agua para miles de millones. La pérdida de los bosques y de las especies afectará a la vida de todos con costes económicos desproporcionados en los países pobres y en vías de desarrollo. Las energías limpias y renovables, como la eólica, son esenciales para mitigar el cambio climático, y son imprescindibles para desterrar la energía nuclear, que supone una amenaza real para la salud y para el medio ambiente ahora y durante cientos de miles de años. Por todos estos motivos la energía eólica debe ser apoyada, ya que Es limpia. No contribuye al cambio climático La energía eólica Es abundante y fiable. La energía eólica, permitirá que sea utilizada para la producción de electricidad en horarios de máxima demanda siendo muy rentable (La lucha contra el cambio climático: Solidaridad frente a un mundo dividido. Informe sobre desarrollo humano 2007/2008.ONU).

Las experiencias en el extranjero son notorias como por ejemplo en España el ahorro por reducción de adquisición de derechos de emisión de CO₂ gracias

al desarrollo de la energía eólica es aproximadamente de 1.300 millones de euros en los próximos 6 años. El 20% de la electricidad en Dinamarca se obtiene a partir de la energía eólica (Anno Scolastico 2003/04).

Cada megavatio (MW) eólico crea 17 puestos de trabajo-año-equivalentes en su fabricación y 5 en su instalación. La industria eólica proporciona empleo a 17.000 personas con una tasa prevista de crecimiento del 11% anual (Ceña, Albeto (2007)).

Es segura y es socialmente aceptada. Las encuestas de opinión demuestran que nueve de cada diez personas, el 90% están a favor de esta tecnología.

Tiene una vida útil superior a 20 años.

Cada kW/h de electricidad generada por energía eólica en lugar de carbón, evita:

- 0,60 kg de CO₂, dióxido de carbono
- 1,33 g de SO₂, dióxido de azufre
- 1,67 g de NO_x, óxido de nitrógeno

Un generador eólico grande produce idéntica cantidad de energía que la obtenida por quemar diariamente 1.000 Kg. de petróleo (Ceña, 2007).

El uso de combustibles fósiles para la generación eléctrica en el país se está incrementando persistentemente en la matriz energética con la termogeneración y turbogeneración por la caída de las reservas hídricas, generando la tendencia a incrementar los precios del servicio, situación que afecta a los hogares de escasos recursos económicos haciendo inaccesible a este servicio tan vital y elemental en un país emergente (Asociación Latinoamericana de Energía Eólica).

El uso de energías limpias y renovables dentro del enfoque de los de MDL demanda de la elaboración de una línea de base a fin de definir y viabilizar su uso. Es así que la aero-generación representa la mas compatible para la generación eléctrica en el del departamento de Huánuco, requiriéndose determinar previamente la energía cinética de los vientos adecuados a fin de generar un mapa eólico y definir las potenciales zonas para la aerogeneración.

1.2.- Formulación del problema

1.2.1.- Problema general

El problema general es el escaso desarrollo de las energías renovables en la región Huánuco.

1.2.2.- Problemas específicos

El problema específico es la ausencia de investigación sobre el diseño de difusor de una turbina hidrocínética.

1.2.3.- Objetivo general y Objetivos específicos

El objetivo general de esta investigación es contribuir con el desarrollo de las energías renovables en la ciudad de Huánuco.

El objetivo específico es implementar un diseño y construcción del difusor de una turbina hidrocínética en el departamento de Huánuco.

1.2.4.- Hipótesis

Si es que se lograra el diseño y construcción del difusor de una turbina hidrocínética, se lograría aportar a las energías renovables.

1.2.5.- Variables

La variable independiente es el difusor de una turbina hidrocínética, mientras que la variable dependiente es la energía cinética del agua que mueve el difusor de una turbina.

Además se tendrán como indicadores a la velocidad del agua y la calidad del difusor de la turbina.

1.2.6.- Justificación e importancia

La situación nacional con relación a nuestra matriz energética esta caracterizada por la constante disminución de la producción de energía eléctrica de fuente hidráulica, significada por la hidroeléctrica del Mantaro que para el presente año solo llegara a producir 700 MW.h de los 1000 MW.h que años atrás ofertaron debido a que los recursos hídricos cada vez disminuyen como efecto del cambio climático global obligando a atender el déficit con el uso de la termogeneración (altamente contaminante) con la consecuente alza del servicio eléctrico que en el presente año a solo 60 días de iniciado el servicio de energía eléctrica subió el 6%.

La pretensión del presente estudio, es la definición de la aerogeneración en el departamento de Huánuco, como alternativa para el suministro de energía eléctrica limpia en los hogares que no pueden acceder al servicio eléctrico actual por su situación económica por que no se cuenta con el suministro correspondiente. Esta alternativa será con la modalidad de autogeneración colectiva o individual que redundará en beneficio del distrito en estudio y de la economía de la población.

Por otra parte definiendo la aerogeneración que es reconocida como un mecanismo de desarrollo limpio (MDL), tendrán derecho a percibir los CERs o bonos de carbono por no emitir CO₂ a la atmósfera en la generación eléctrica, incrementando un beneficio económico a la población.

1.2.7.- Viabilidad

Debido a la presencia de causas fluviales y la posibilidad de adquirir los instrumentos necesarios para medir las variables dependientes e independientes, este proyecto de investigación es viable.

1.2.8.- Limitaciones

El presente trabajo de investigación se limita a la determinación de la energía cinética del agua adecuado para el diseño y construcción del difusor de una turbina hidrocínética en la región Huánuco.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Materiales

Se emplearán los siguientes materiales:

- Planos del distrito
- Sensores de medición de velocidad del agua.
- Sensores para determinación de temperaturas.
- Sensores para determinación de la humedad.
- Software para registro y procesamiento de información de los sensores.
- Software para LabView.
- Cámara fotográfica digital.
- Cámara filmadora.
- GPS.
- Brújula.
- Equipo de cómputo completo.
- Kits de materiales de escritorios.
- Kits de materiales de impresión.

2.2.- Definiciones conceptuales

1. Realizar un análisis de composición y caracterización fisicoquímica al estiércol de sajino.
2. Determinar el potencial bioquímico de metano (BMP) del estiércol de sajino, en condiciones mesofílicas y termofílicas.

3. Determinar la tasa de carga orgánica promedio a partir de la producción normal de estiércol de sajino en una granja de sajino.
4. Determinar la producción de metano mediante experimentos mesofílicos y termofílicos de DA húmeda y DA seca.

2.3.- Métodos

Se considerara un muestreo de diez mil (10,000) datos en tiempo real con el sistema LabView para Windows en los puntos muestreados dentro del distrito de San Pedro de Chaulan durante 30 días las 24 horas del día.

2.4.- Tipo de investigación

La investigación es exploratoria y cuasi experimental, prolectiva y en cuanto al periodo de captación de la información es transversal.

2.5.- Diseño y esquema de la investigación

El diseño y esquema de investigación se basará en la técnica del sistema de adquisición de datos de LabView para Windows.

2.6.- Población y muestra

La población se considera como todo el diseño de generadores de energía eléctrica.

El tamaño de muestra se calculó de acuerdo a la siguiente formula:

$$n_0 = \frac{Z^2 PQ}{E^2}$$

Donde:

n_0 = Tamaño de muestra tentativo

Z^2 = Estadígrafo obtenido al 95% de confianza (Equivalente a 1.96)

P = Es la característica favorable de la variable independiente (Consideramos que el 80% de los vientos de la zona son favorables para la aerogeneración)

Q = Es la característica favorable de la variable independiente (Consideramos que el 20% de los vientos de la zona son favorables para la aerogeneración)

E^2 = Error de muestreo (Se considerará un error del 5%)

De esa manera, se obtuvo un tamaño de muestra tentativo de $n_0 = 245.76 \cong 246$ puntos de muestreo en poblados.

Ahora, considerando que dentro del área de muestreo se tienen 8 poblados (N), entonces, el tamaño de muestra real se calculará de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}}$$

Obteniendo un resultado de 8.0 puntos de muestreo.

2.7.- Instrumentos de recolección de datos

Los Instrumentos de recolección de datos son los sensores de flujo con la tarjeta de National Instrument de adquisición de datos con el programa LabView.

2.8.- Técnicas de recojo, procesamiento y presentación de datos

Los datos obtenidos a través del programa LabView se mostrarán en tablas y gráficos de acuerdo a parámetros establecidos en los protocolos estadísticos, propuestos en el proyecto.

Los parámetros a evaluar se someterán a un análisis de varianza de un factor (ANOVA).

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

3.1.- Consideraciones para el análisis dinámico del fluido

Análisis de la ejecución de un rotor de paletas hidrocínética tipo Darrieus recta puede llevarse a cabo mediante la utilización de los métodos convencionales de estudios de viento y la energía de las mareas. Una unidad de turbina típico empleado en la generación de electricidad puede consistir en una estructura de rotor junto con los componentes tales como, engranajes, cojinetes, generador eléctrico, de acondicionamiento de potencia, y la unidad de carga final (Fig. 1 (a)). El objetivo principal del sistema es la de convertir la energía mecánica en forma eléctrica. Por lo tanto, la investigación de la actuación del rotor es de gran importancia y este aspecto se enfatiza aquí en esta discusión.

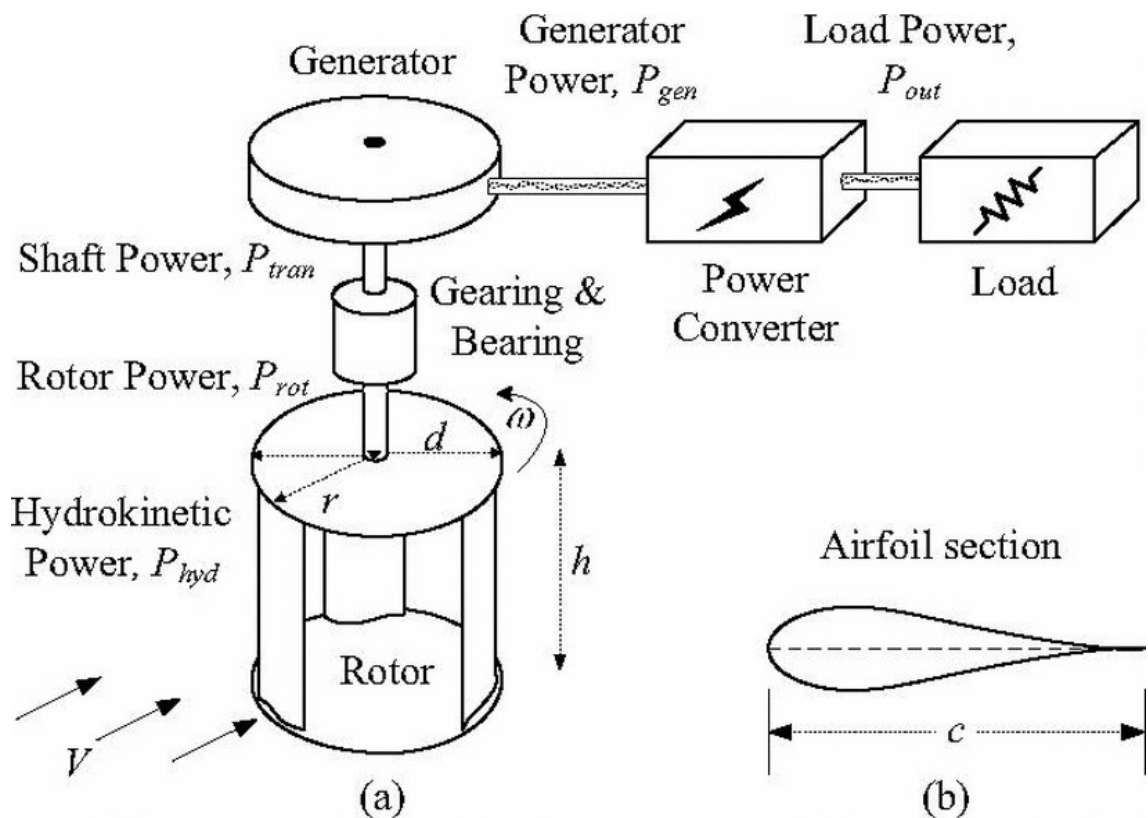


Figura 1: Componentes del sistema de turbina

La fórmula de entrada de energía hidrocínética puede estar relacionado con mecánica de captura de la potencia del rotor por un término comúnmente conocido como coeficiente de potencia C_p , que es una medida de la eficiencia hidrodinámica de la turbina.

$$P_{rot} = C_P P_{hyd}(1)$$

Para una turbina con un área efectiva de barrido de A (m^2) colocado en un cuerpo que tiene fluido de velocidad V (m / s) y ρ la densidad (kg / m^3), esta expresión se puede volver a escribir como

$$P_{rot} = C_P \frac{1}{2} \rho A V^3 (2)$$

En la mayoría de la literatura, las dos magnitudes adimensionales: coeficiente de potencia C_p y la relación de velocidad punta (λ) se utilizan para ilustrar la efectividad de la extracción de energía de una turbina en diferentes condiciones de rotación. Aquí, la relación de velocidad de la punta (λ) es un índice de la velocidad de rotación del rotor ω (rad / s) en contra de la velocidad del fluido V . Esto se define como

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} (3)$$

donde, R es el radio del rotor en metros. Otro coeficiente de término, el par C_T es igualmente importante en lo que indica el rendimiento de una turbina. Esto se define como

$$C_T = \frac{C_P}{\lambda} (4)$$

Un conjunto de curvas C_p vs. λ se muestra en la Fig. 2, que ilustra la superioridad de la horizontal del tipo de hélice y eje turbinas Darrieus frente a otras opciones de rotor en términos de eficiencia. Sin embargo, las turbinas de

tipo drag (tales como, Savonius y Multipala tipos) tienen mejores capacidades de partida.

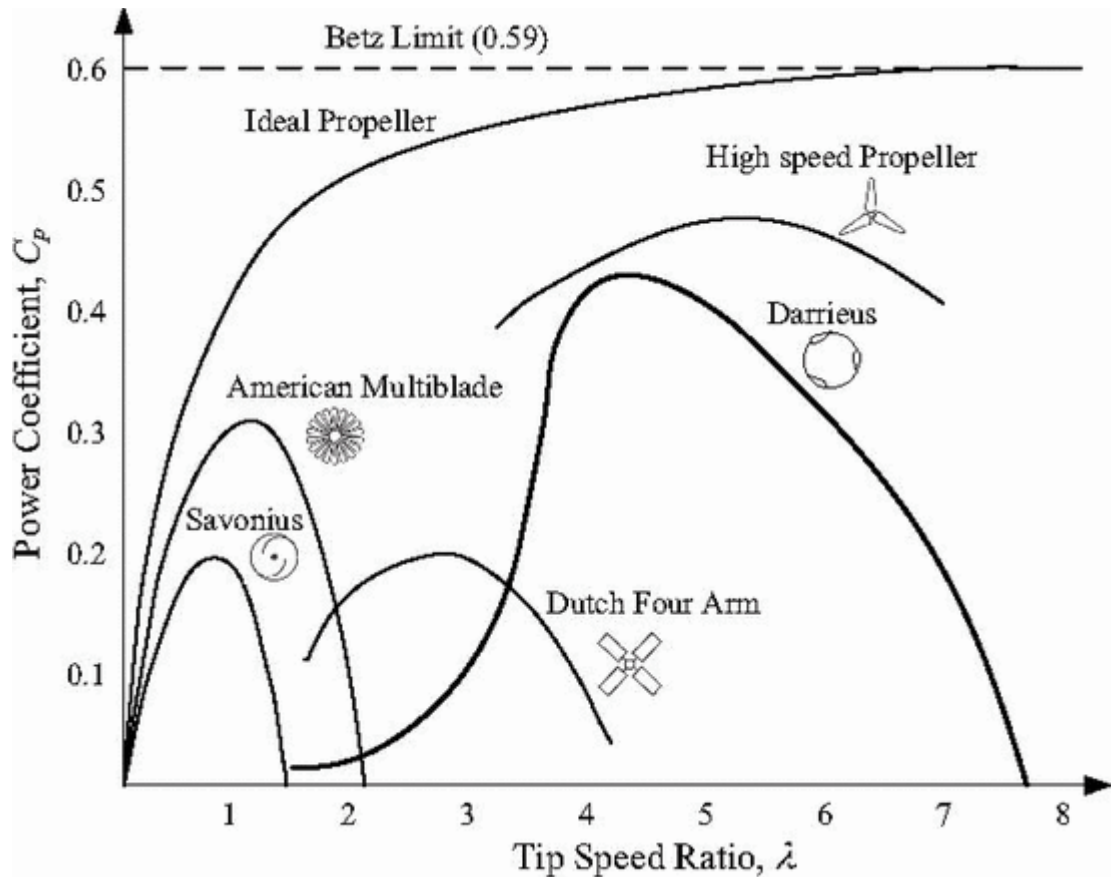


Figura 2: Desempeño de varios rotores

El valor máximo teórico de la C_p coeficiente de potencia se conoce como el límite de Betz, que tiene un valor numérico de 0,59. El uso de canales o conductos de aumento de alrededor de una turbina puede aumentar este límite teórico al concentrar el flujo de energía de entrada hacia el rotor.

Con el fin de desarrollar una visión del principio de funcionamiento de una turbina, la distribución de la presión y la velocidad alrededor de un rotor y sus efectos posteriores sobre las cuchillas deben ser estudiados utilizando los principios de la dinámica de fluidos. Como una corriente de líquido se aproxima in-

teractúa con el disco del rotor, la presión justo antes y después de que el rotor se hace igual en magnitud pero de signo opuesto en comparación con la presión circundante. El límite del tubo de corriente también se aparta de la turbina en la estela del cuerpo giratorio. La velocidad aguas arriba V se reduce a V_{rot} en el disco del rotor, lo que reduce aún más a la velocidad aguas abajo V_{dwn} como se muestra en la Fig. 3. Bajo tales circunstancias, el factor de inducción a se define como,

$$a = 1 - \frac{V_{rot}}{V} \quad (5)$$

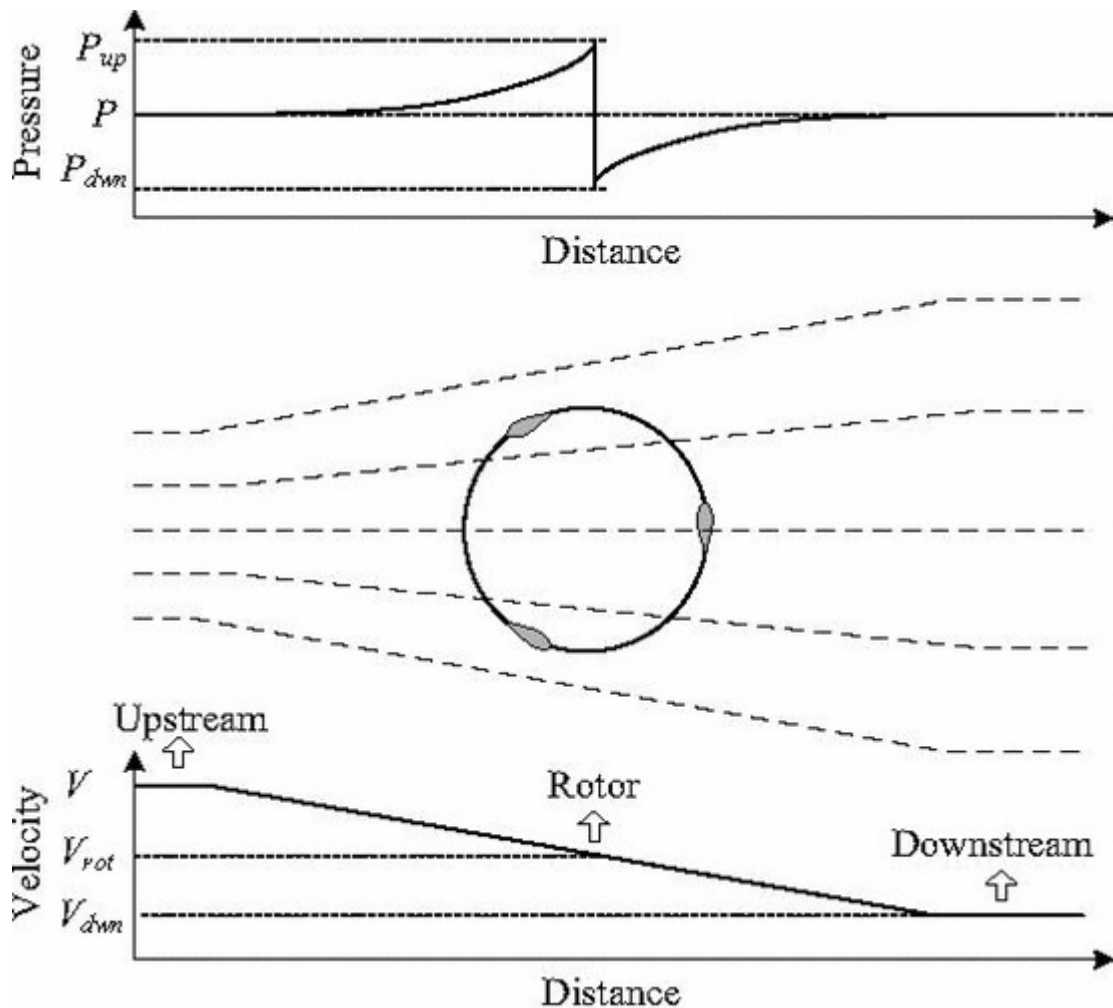


Figura 3: Distribución de presión y velocidad alrededor de una turbina

Las turbinas Darrieus emplean cuchillas en forma de la superficie de sustentación, que utilizan principalmente la fuerza de sustentación generada debido al movimiento de la cuchilla contra el flujo de agua. Para un sistema bien diseñado la fuerza de arrastre generada durante el proceso es típicamente menor que el componente de ascensor. Para una forma de la hoja dada y el número de Reynolds, los datos de coeficiente de sustentación / resistencia es comúnmente disponible en tabla / formas gráficas tabulados / conspiró contra ángulo de ataque de la información [1], [3]. El efecto acumulativo de estas fuerzas se puede separar más a lo largo de los ejes normales y tangenciales de la hoja, donde la componente tangencial es responsable para hacer girar el rotor. Con una fórmula de velocidad de rotación dada, y aguas arriba de velocidad Fórmula, las palas del rotor desarrollan niveles variables de ángulos de ataque (alfa) con el cambio de ángulo de azimut (theta) (Fig. 4 (a)).

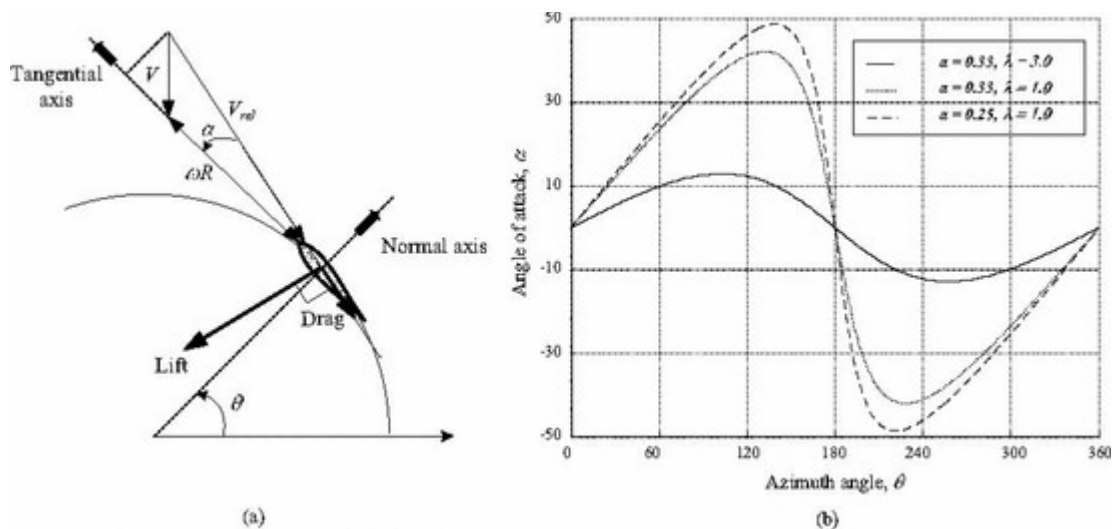


Figura 4: Interacción pala (hoja) - flujo

La expresión dada en (6) se puede utilizar para determinar el ángulo de ataque desarrollado en la pala a medida que viaja a lo largo de la periferia circular

del disco giratorio. Tal variación del ángulo de ataque a lo largo de camino de desplazamiento de la cuchilla se muestra en la Fig. 4 (b). Inetthe ángulo de ataque desarrollado en la cuchilla a medida que viaja a lo largo de la periferia circular del disco giratorio. Tal variación del ángulo de ataque a lo largo de camino de desplazamiento de la cuchilla se muestra en la Fig. 4 (b).

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{-(1-a) \sin \theta}{(1-a) \sin \theta + \lambda} \right) \quad (6)$$

El componente de fuerza tangencial, que determina efectivamente el efecto acumulativo que causa que el rotor gire, se puede expresar en términos de un coeficiente de fuerza asociado C_{tang}

$$C_{tang} = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (7)$$

- donde, C_L y C_D son sustentación y resistencia coeficientes de la hoja de aerodinámica. Estos dos parámetros dependen únicamente de la forma de la hoja y el número de Reynolds bajo una condición de funcionamiento dada, y necesitan ser visitada mediante conjunto adecuado de datos tabulados. Comúnmente los conjuntos de datos disponibles, tales como en [1], [3] no son fácilmente utilizables para el análisis de las turbinas Darrieus que se utilizan en aplicaciones hidráulicas. Estos cuadros suelen contener información sustentación / resistencia de alto número de Reynolds, de bajo ángulo de ataque y la relación hoja aspecto infinito. Medidas correctivas adecuadas necesitan ser realizados en los conjuntos de datos disponibles con el fin de usarlos en un análisis más detallado de dinámica de fluidos. Estos tres aspectos se tratan brevemente en las discusiones a continuación:

- Modificación Número de Reynold: número de Reynolds es un índice de turbulencia creada por un cuerpo colocado en el fluido [1], [4]. Esto se puede expresar como

$$R_e = \frac{V \cdot d}{\nu} (8)$$

donde, $\nu = 1,1 \times 10^{-6}$ es la viscosidad cinemática del agua [4]. Para un diámetro d rotor dada y la velocidad del agua V , una estimación de R_e se puede encontrar. Para este trabajo, R_e se toma como $1,5 \times 10^6$, que está en línea con trabajos similares reportados [5]. Sin embargo, la mayoría de los datos de la superficie de sustentación no se tabulan fácilmente para este número de Reynolds en particular y las medidas correctivas deben emprendido antes de utilizar estos datos [2].

- Modificación de la relación de aspecto: La relación de aspecto de una hoja es una medida de su longitud y esbeltez. Para una cuchilla con longitud de cuerda c y la altura h (Fig. 1), la relación de aspecto se define como

$$AR = \frac{h}{c} (9)$$

Típica de datos de perfil aerodinámico se da para la relación de aspecto infinito, mientras que un cierto hoja es de longitud finita. Esto exige una modificación de los datos disponibles para un caso de aplicación dada.

- Ángulo de modificación ataque: Normalmente para el bajo ángulo de ataque (por lo general, 10-20 °) los datos de elevación y arrastre, como se muestra en la figura 5. Sin embargo, para una turbina de Darrieus, este ángulo puede variar ampliamente dependiendo de la posición y la velocidad de una cuchilla (Fig. 4 (b)). Rendimiento analysisof una turbina tales

fallará si no se incorpora la modificación de datos de ángulo alto de casos de ataque.

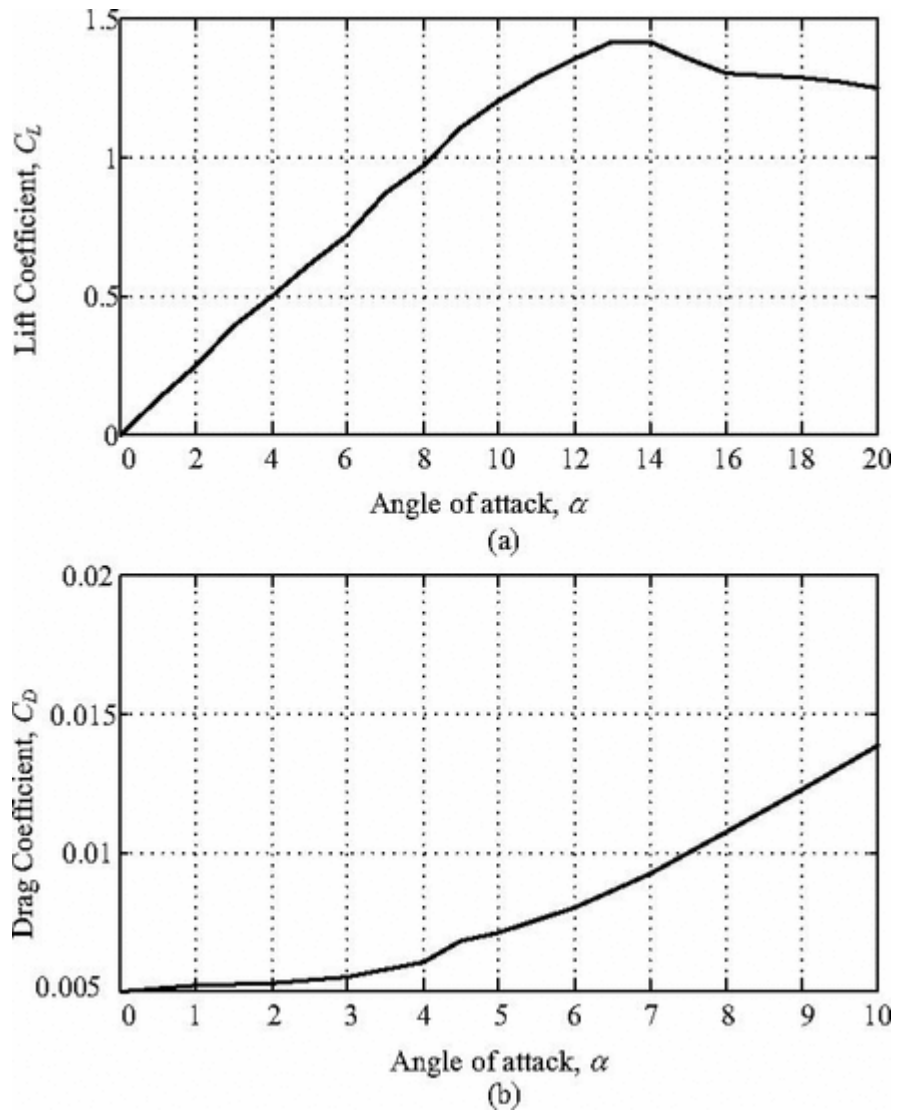


Figura 5: Datos típicos de superficie de sustentación (NACA 63-018)

Un procedimiento detallado en [2] se puede utilizar para obtener datos de perfil aerodinámico corregidos. El empleo de estos cálculos en Matlab [6], parcelas significativamente divergentes para la aerodinámica NACA 63-018 se encontró (Fig. 5, Fig. 6).

Predicción del rendimiento dinámico del fluido de rotores Darrieus se puede abordar a través del modelado matemático detallado. Dos métodos comunes aplicadas a este respecto son: sencilla impulso (tubo de corriente única o múltiple) de modelado y modelado vórtice complejo de [1], [2]. Como el nombre implica, en el modelado único tubo de corriente, el rendimiento del rotor completa se determina sobre la base de los cálculos realizados en un solo tubo de líquido streaming. Por otro lado, en el análisis de múltiples tubo de corriente, se asumen una serie de igualdad streamtubes que pasar por el rotor. Para cada tubo, las ecuaciones de movimiento se calculan y los efectos de todos los streamtubes están integrados con el fin de determinar las fuerzas que actúan sobre una pala de rotor. Aunque, el modelado único tubo de corriente ha demostrado ser suficientemente exacto para la mayoría de aplicaciones, este método falla para explicar los campos de flujo de todo el rotor. En el otro extremo, los métodos como los modelos de vórtice y doble múltiples modelos de tubo de corriente son más precisos cuando se incorporan las hipótesis y los insumos adecuados. Por lo tanto, en este trabajo, el modelado múltiple tubo de corriente se ha adoptado con el fin de mantener la exactitud razonable y simplicidad mediante la utilización de las capacidades de computación de los ordenadores de hoy en día.

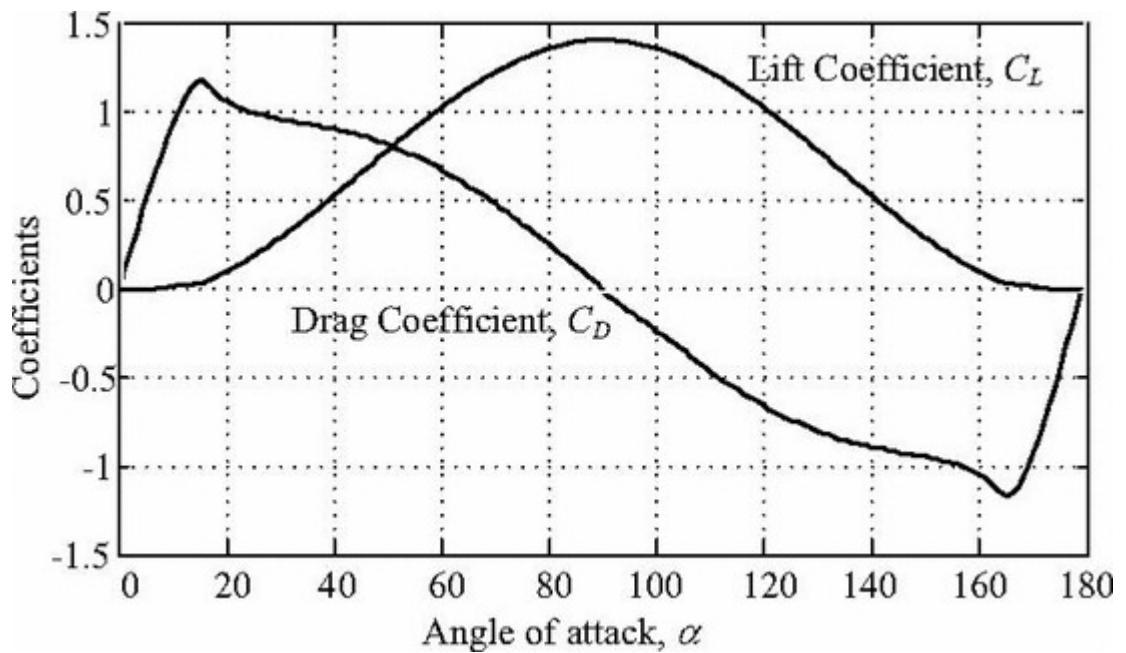


Figura 6: Datos modificados de superficie de sustentación

Bajo tal enfoque de modelado, el coeficiente de par de un palas de la turbina Darrieus recta se da como [2]

$$C_T = \sigma \frac{\sum_{i=1}^m (\frac{V_{rel}}{V})^2 C_{tang}}{m} \quad (10)$$

donde, m es el número de streamtubes y rho es la solidez del rotor, definida como

$$\sigma = \frac{Nc}{d} \quad (11)$$

aquí, N es el número de cuchillas, c es la longitud de cuerda de la pala y d es el diámetro del rotor. La integración de las contribuciones de par de cada tubo de corriente, la C_T coeficiente de torsión se puede determinar usando (10). El C_P coeficiente de potencia puede ser evaluada usando (4).

Siguiendo los pasos antes mencionados para el modelado de corrientes múltiples de tubo, se obtiene un conjunto de curvas de rendimiento para la hoja

recta Darrieus (solidez 25%, NACA 63-018 palas) y se representa gráficamente en la Fig. 7.

Como se ve en esta figura, las capacidades de potencia y par del rotor Darrieus son pobres en las condiciones de baja velocidad punta. Aunque diversos niveles de solidez del rotor pueden cambiar estas curvas a derecha o izquierda, el problema de partida sigue siendo. El par de arranque depende de la posición angular del rotor como se muestra en la Fig. 4 (b). La turbina puede auto-iniciará si una hoja se mantiene firmemente en la posición óptima donde la fuerza tangencial generada supera los requisitos de partida. Este problema también puede ser abordado por medios mecánicos, eléctricos o electromecánicos externos.

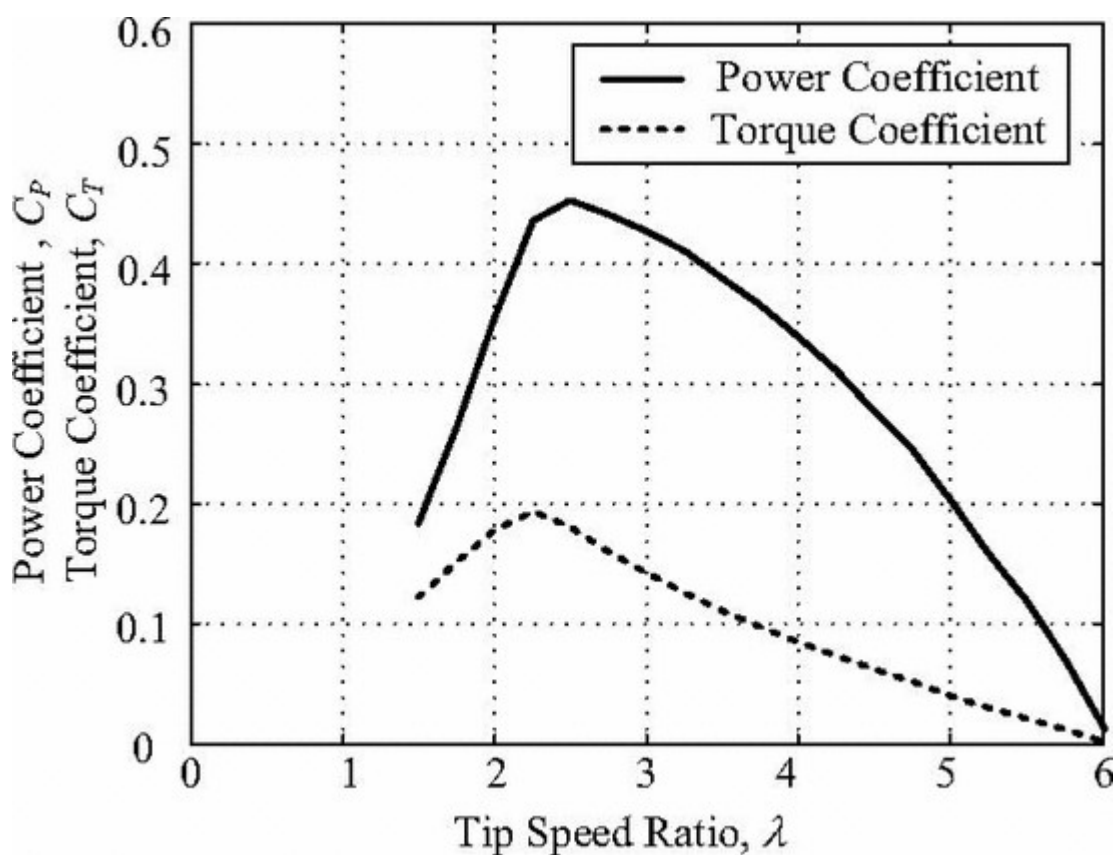


Figura 7: Gráfica de desempeño de una turbina de Darrieus

3.2.- Diseño del rotor de hoja recta de Darrieus

El problema de diseño de recta rotor de paletas Darrieus es esencialmente un problema de optimización que se solicita la decisión sobre la estructura, dimensión y la hoja de diseño del rotor. Para una aplicación dada (río o energía de las mareas), los parámetros dependientes de los recursos, tales como, la densidad del agua y el caudal medio anual es necesario incorporar. Aparte de conocimiento común de diseño del sistema, consideraciones de dinámica de fluidos también son traídos durante el proceso de diseño.

Entre los dos tipos de hoja recta turbina Darrieus, el rotor H-Darrieus se utiliza sobre todo en las turbinas más grandes, donde la resistencia mecánica es de gran importancia [7]. En las turbinas más pequeñas, el uso de la estructura de tipo H puede causar turbulencia significativa, reduciendo la eficiencia de la turbina. Por lo tanto, la configuración de jaula de ardilla es adecuado para la generación de energía de baja escala como se ejemplifica en [8] [9] [10] [11]. En las discusiones a seguir, este tipo de rotor será considerada, aunque el diseño de rotores H-Darrieus también se puede abordar con la misma técnica.

3.2.1.- Dimensionamiento básico

Para la forma cilíndrica del rotor de jaula de ardilla de hoja recta, dimensionamiento básico implica una decisión sobre la elección del diámetro del rotor y la altura. El proceso de diseño se puede iniciar mediante la modificación de la expresión de energía dada en (2) para la incorporación de la eficiencia general del sistema como se indica en (12).

$$P_{out} = \eta_{sys} \frac{1}{2} \rho A V^3 (12)$$

Los η_{sys} eficiencia global del sistema se define en términos de contribuciones de eficiencia de todas las etapas en cascada (Fig. 1 (a)) como se da en la ecuación,

$$\eta_{sys} = C_P \cdot \eta_{drv} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{con} \quad (13)$$

La regla del pulgar para estos términos de eficiencia se tabulan en la Tabla I.

Tabla 1: Valores típicos de eficiencia

Efficiency term	Typical value	Ref.
Hydrodynamic, C_P	0.45	[7], [12], [13]
Gearing-bearing, η_{drv}	0.90	[9]
Generator, η_{gen}	0.875	[9]
Power Converter, η_{con}	0.875	[9]

El valor de entrada de la densidad del agua puede variar significativamente de un sitio determinado (río y mar), que podrán referirse más a la temperatura media anual y la ubicación geográfica. Decisión sobre este parámetro se puede hacer a través de la gráfica se muestra en la Fig. 8 (a)

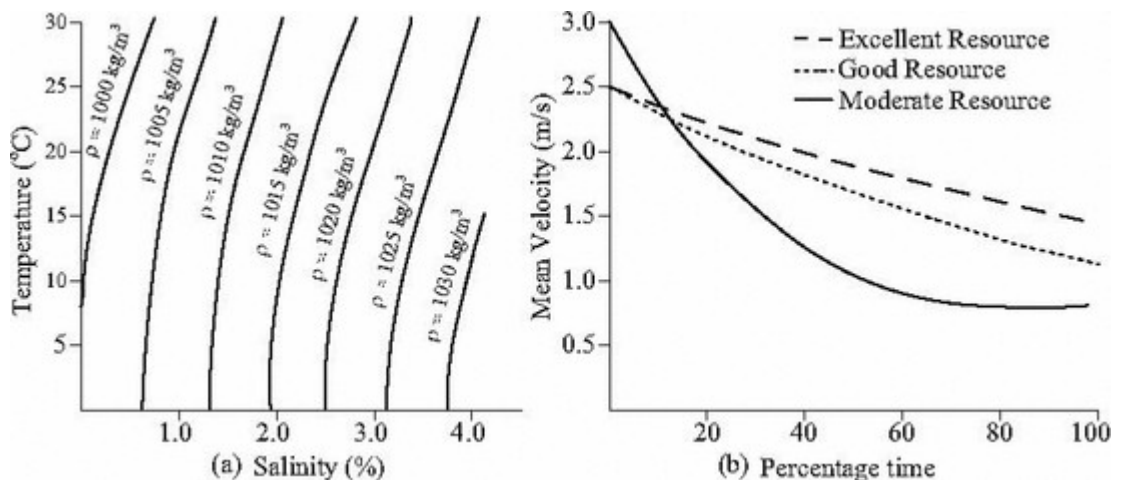


Figura 8: (a) Variaciones de la densidad del agua (b) Curvas de velocidad duración y clasificación de recursos

La decisión sobre la velocidad del agua, que también puede denominarse como la velocidad nominal desde el punto de vista del diseño, es un problema sin resolver por sus propios méritos. Este término puede comprender varios otros factores como se indica en (14):

$$V = V_{mean} \cdot f_{aug} \cdot f_{econ} \quad (14)$$

Aquí, V_{mean} significa velocidad media del agua del río. Decidir un valor para este plazo requiere un estudio de los patrones de la velocidad del agua en varios ríos en una base global. Los valores razonables se pueden seleccionar y cualidades de recursos se pueden etiquetar contra cada nivel de velocidad. A falta de un estudio tan detallado, resultado de una investigación micro escala informó en [14] se optó en este ejercicio (Fig. 8 (b)).

El factor de aumento 'faug' en (14) esencialmente incorpora los efectos de la adición de un dispositivo de aumento de canal. Un valor moderado de faug = 1,5 se considera en este trabajo, mientras que los informes de aún mayor valor está disponible en [14], [15]. El término restante en la expresión de velocidad, f_{econ} se refiere la economía de una turbina que funciona en diferentes velocidades alrededor del año. Las discusiones sobre la elección óptima de la velocidad nominal de los aerogeneradores de velocidad variable puedan encontrarse en [16]. El uso de este factor es común en los diseños de turbinas de viento, donde una velocidad típica de viento nominal es de alrededor de 10 a 12 m / s, incluso si el sitio de la velocidad media es 7-8 m / s. En este trabajo, se elige un f_{econ} valor más conservador = 1,5.

Utilizando los valores fácticos de la densidad del agua, la velocidad nominal y términos de eficiencia en (12), el área barrida por el rotor A puede ser deter-

minado para un determinado nivel de potencia de salida deseada. El área efectiva encontrada por el agua es esencialmente un rectángulo, dado como:

$$A = h \cdot d \quad (15)$$

A pesar de que, diferente altura (h) y el diámetro (d) combinaciones pueden producir la misma área del rotor y por lo tanto la misma potencia teórica, el rendimiento final del sistema depende de varios factores más sutiles. Una visión cualitativa de estas cuestiones se da a continuación:

- La captura de energía y la eficiencia: Para un área de nivel de potencia y el rotor dado, un aumento del diámetro implica disminución de la altura de la turbina. Puesto que, las cuchillas en forma de la superficie de sustentación están presentes en sólo el espaciado vertical, esta medida reduce el tiempo la potencia de salida. En un rotor con un mayor diámetro de las cuchillas se pueden separar muy separados. Esto reduce los efectos mutuos debido a la turbulencia, finalmente, la elevación de la eficiencia. Por lo tanto, un comercio necesita de ser alcanzado entre la eficiencia del rotor y potencia de salida mientras se decide la relación altura-diámetro [9].
- Par, la velocidad y la selección del generador: La selección de un generador eléctrico depende en gran medida de la velocidad del rotor y el par. Con el aumento de diámetro y la altura reducida (para un área de nivel de potencia dado y rotor), la velocidad del rotor se reduce y aumenta el par del eje. En relación con el uso de un generador de accionamiento directo o bajo conversión de relación de transmisión, no se recomienda

esta medida. Por el contrario, el par más alto puede reducir el problema de rotor de partida para una turbina de eje vertical [11].

- Comportamiento en el flujo sesgada: el flujo de fluido sesgada es significativo en canales de flujo restringidas tales como, río poco profundo o entorno construido. Dependiendo del ángulo de inclinación, rotores con proporciones variables altura-diámetro actúan de forma diferente. Tales consideraciones deben ser incorporados en el proceso de diseño cuando los patrones de flujo no son uniformes para un canal [17].

Una decisión sobre la relación altura-diámetro h / d , (valores típicos puede variar de 0,5 a 1,5) daría valores de la altura y el diámetro de rotor (15).

3.2.2.- Diseño del rotor y difusor

Cuando el dimensionamiento básico esta completado, el problema siguiente es seleccionar un conjunto de hojas con cierta forma y solidez. Las aspas de un dispositivo del tipo de ascensor son de forma aerodinámica y las fuerzas tangenciales inducidas en las hojas son los principales motores del rotor. Por lo tanto, los factores de dinámica de fluidos dictan su rendimiento y el proceso de diseño cuchilla requiere el modelado predictivo rendimiento y la toma de decisiones delicada.

Probablemente el problema más importante y cliché en el proceso de diseño del rotor se pregunta qué número de palas sería optimizar el rendimiento de una turbina. Aunque un buen número de estudios teóricos y experimentales que tratan este problema está disponible [2], [5], [7], [9], [10], [13], [18], [19], no hay solución acordada. Con el aumento de número de cuchillas, la solidez de la turbina aumenta y par inducido es mayor. Esto reduce el problema de partida

de turbinas Darrieus. Por el contrario, menor número de cuchillas reduce la turbulencia del flujo de fluido y aumenta la eficiencia hidrodinámica. Una turbina con álabes menores usualmente se ejecuta en altas rpm, lo que facilita el problema de selección del generador. Aunque, la incorporación de 2 a 6 cuchillas es posible, ejemplos de 4 o 5 palas de turbinas Darrieus son más comunes para aplicaciones hidráulicas [7], [10].

El problema posterior, que también es un problema abierto, es decidir sobre la forma de perfil aerodinámico para ser utilizado. Puesto que las turbinas de agua experimentan grandes variaciones de par como una cuchilla gira a lo largo de la circunferencia del rotor, palas simétricas son generalmente preferidos [5], [7], [9], [10], [13], [18], [19]. Los perfiles de hoja más comunes utilizados en las turbinas Darrieus son: NACA 0012, NACA 0015, NACA 0018, y NACA 63-018. Disponibilidad de datos sustentación / resistencia puede llegar a ser difícil para algunas formas (por ejemplo: NACA 63-018) especialmente para bajo número de Reynolds como se explicó anteriormente.

La dimensión de un rotor, el número de hojas y longitud de la hoja de acordes están interrelacionados a través de información solidez, como se expresa en (11). Turbinas hidráulicas son de mayor solidez que las turbinas eólicas y los valores de solidez pueden variar desde 0,15 hasta 1,6 [2], [5], [10]. Baja solidez implica un mejor rendimiento hidrodinámico y valores más altos generalmente permiten estructura mecánica más fuerte y el aumento de par inducido [5], [7], [9], [10], [13], [18], [19]. Para una forma de la hoja determinada, la decisión sobre el número de hoja y longitud de la cuerda se puede abordar a través de análisis de rendimiento de dinámica de fluidos. Los métodos de modelado dis-

cutidos en la sección anterior pueden usarse en este sentido. Análisis tubo de corriente múltiple lleva a cabo en una turbina que consta de NACA 63-018 cuchillas se representa en la Fig. 9.

Como se observa en el gráfico, los valores de solidez alrededor de 0,30 estiman más adecuados para la forma dada hoja (NACA 63-018) y aplicación (hidro). Sin embargo, consideraciones prácticas tales como, modelo inexactitud, resistencia estructural, y el aumento de la inducción de par pueden requerir aún mayor solidez. Cuando un cierto valor se decide Basándose en estas observaciones, la cuchilla de longitud de la cuerda puede ser determinada utilizando (11) para un rotor con número específico de cuchillas. Además, la velocidad del rotor puede calcularse a partir de datos de relación de velocidad de la punta obtenidos a partir de la Fig. 9 y (3). La información sobre la velocidad de giro del rotor es de vital importancia en la selección de mecanismo de engranaje / correcta transmisión y el generador eléctrico.

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se explica en los apartados anteriores, el diseño de un rotor Darrieus implica modelos de actuación y toma de decisiones en base a observaciones prácticas. El proceso de diseño se puede describir con un diagrama de flujo dada en la Fig. 10. Los dos componentes principales de este proceso es analizar el rendimiento de la turbina y en base a los resultados, decidir sobre los parámetros de diseño.

En este trabajo, un ejercicio en el diseño del rotor con la NACA 63-018 cuchillas se lleva a cabo. Datos de cuchilla primas (Fig. 5) se ha modificado para $R_e = 1,5 \times 10^6$, $AR = 10$ y $\alpha = 0 - 180^\circ$ (Fig. 6). Modelado de tubo de corriente múltiple se realizó en Matlab y parcelas de rendimiento se dan en la Fig. 9. A partir de estas parcelas, una ρ valor solidez = 0,25 aparece más razonables.

Para una potencia de salida deseada $P_{out} = 1,000 \text{ W}$, clasificado velocidad del agua $V = 2,25 \text{ m / rho}$ (a partir de (14), teniendo $V_{mean} = 1,0 \text{ m / s}$) y $n_{sys} = 31\%$ (a partir de (13) y en la Tabla 1), el área de barrido del rotor se encuentra para ser, $A = 0,566 \text{ m}^2$. Decidir altura-diámetro $h / d = 1 / 1,5$, los valores de la altura y el diámetro del rotor son: $h \sim 0,6 \text{ m}$ y $d \sim 0,90 \text{ m}$.

Con los datos de rendimiento y dimensiones básicas disponibles en la mano, el procedimiento de diseño de la pala se puede iniciar. Decidiendo la turbina para ser de 5 cuchillas ($n = 5$), la longitud de cuerda de cada álabe se encuentra por (11). Para una solidez $\rho = 0,35$, la longitud de la cuerda se encuentra que es, $c \sim 6,25 \text{ cm}$. Además, en la Fig. 9, relación de velocidad punta óptima

para esta turbina es $\lambda = 2,25$. Con este valor en (3), se encuentra la velocidad del rotor se prevé esté alrededor de 100 rpm.

Dado que estos pasos de diseño implican muchas decisiones de causa-efecto y aproximaciones, el rendimiento final de una turbina podría desviarse considerablemente de los resultados deseados. Las consideraciones estructurales, sin duda, alterar el diseño del rotor. Un método más aceptable sería diseñar-prueba de rediseño, a pesar de que esto puede costar tiempo y recursos significativos.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha presentado una visión de conjunto comparativa y detallada de varias configuraciones de rotores hidrocinéticos seguida por discusiones sobre el modelamiento del desempeño de la dinámica de fluidos. Un enfoque de diseño sistemático para los rotores de Darrieus incorporando un conjunto de observaciones prácticas ha sido el foco principal de esta tesis. El procedimiento, información y ejemplo dados en esta tesis están orientados al desarrollo y comprensión de como diseñar de nuevo una turbina de hojas rectas de Darrieus.

SUGERENCIAS

La cuestión más sutil, la de hallar una configuración óptima de rotor (dimensión, solidez, forma de la hoja o álabe) aún permanece como un problema abierto. Sin embargo, el enfoque presentado en esta tesis puede servir como un buen punto de partida.

BIBLIOGRAFÍA

1. I. Paraschivoiu, Wind Turbine Design: with Emphasis on Darrieus Concept. Canada: Polytechnic International Press, 2002, ISBN 2- 553-00931-3.
2. (2005, Sept.) Darrieus wind turbine analysis. [Online]. Available: <http://windturbine-analysis.com/index.htm>
3. Ira H. Abbott and Albert E. von Doenhoff, Theory of wing sections, including a summary of airfoil data. New York: Dover Publications, 1959, ISBN: 4860605868
4. J. P. Breslin and P. Andersen, Hydrodynamics of ship propellers. New York: Cambridge University Press, 1994, ISBN 0521413605
5. Sergio M. Camporeale and Vinicio Magi, "Streamtube model for analysis of vertical axis variable pitch turbine for marine currents energy conversion," Energy Conversion & Management, vol. 41, pp. 1811-1827, 2000.
6. (2005, Aug.) Matlab-Simulink is a product of The Mathworks Inc, Natick, MA 017-2098, USA. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com>
7. B. Davis, "Low head tidal power: a major source of energy from the worlds oceans," in Proc. 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference IECEC-97, vol. 3, Aug. 1997, pp. 1982-1989.
8. Geraldo L. and Tiago Fo, "The state of art of hydrokinetic power in brazil," International Small Hydro Technologies, Buffalo, NY, USA, Jul. 2003, pre-conference Workshop.

9. Qinetiq Ltd., "Cycloidal tidal power generation - phase 1," Report for DTI Technology Program, Qinetiq Ltd., UK, Tech. Rep. T/06/00229/REP/1, 2004.
10. Mitsuhiro Shiono, Katsuyuki Suzuki, and Seiji Kiho, "An experimental study of the characteristics of a darrieus turbine for tidal power generation," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 132, no. 3, 2000.
11. K. Nilsson, E. Segergren, and M. Leijon, "Simulation of direct drive generators designed for underwater vertical axis turbines," in *Proc. Fifth European Wave Energy Conference*, Cork, Ireland, Sep. 2003.
12. S. Kiho, K. Suzuki, and M. Shiono, "Study on the power generation from tidal currents by darrieus turbine," in *Proc. International Offshore and Polar Engineering Conference*, vol. 1, 1996, pp. 97-102.
13. B. Kirke. (2005, Aug.) Developments in ducted water current turbines. Tidal paper 16-08-03 1. [Online]. Available: <http://www.cyberiad.net/tide.htm>
14. R. L. Radkey and B. D. Hibbs, "Definition of cost effective river turbine designs," Report for U.S. Department of Energy, Aerovironment Inc., Pasadena, California, Tech. Rep. AV-FR-81/595 (DE82010972), Dec. 1981.
15. F. Ponta and G. Shankar Dutt, "An improved vertical-axis water-current turbine incorporating a channelling device," *Renewable Energy*, vol. 20, no. 2, pp. 223-242, 2000, ISSN 0960-1481.
16. Robert Harrison, Erich Hau, and Herman Snel, *Large Wind Turbines: Design and Economics*. John Wiley & Sons, Feb. 2001, ISBN: 0471494569.

17. Sander Mertens, Gijs van Kuik, and Gerard van Bussel, "Performance of an H-Darrieus wind turbine in the skewed flow on a roof," *Journal of Solar Energy Engineering*, ASME, vol. 125, pp. 433-440, Nov. 2003.
18. Mitsuhiro Shiono, Katsuyuki Suzuki, and Seiji Kiho, "Output characteristics of darrieus water turbine with helical blades for tidal current generations," in *Proc. International Offshore and Polar Engineering Conference*, vol. 12, 2002, pp. 859-864.
19. Seiji Kihon and Mitsuhiro Shiono, "Electric power generations from tidal currents by darrieus turbine at kurushima straits," *Transactions of IEE Japan*, vol. 112-D, no. 6, pp. 530-538, 1992.