

Proel 5

METODOLOGIA DE DISEÑO

Ing. MIGUEL ANGEL VEGA MARQUEZ
 Profesor Asociado - Universidad Nacional de Colombia
 Facultad de Ingeniería
 Co-Investigador en Energía Eólica.

RESUMEN

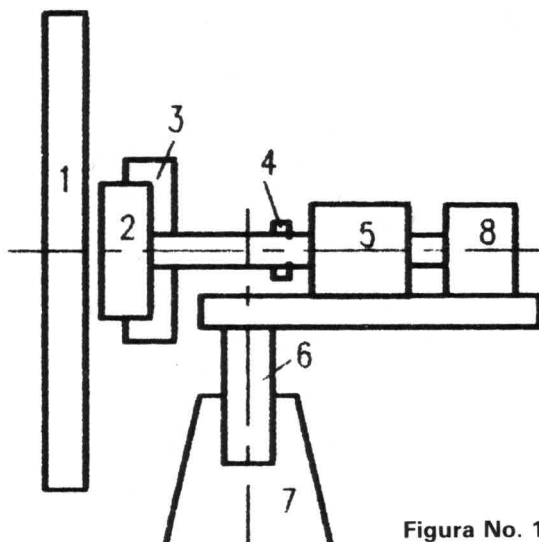
El presente artículo busca presentar de una manera breve cómo ha evolucionado el proceso de diseño y construcción de un aerogenerador de 5 kw, como parte del trabajo del equipo de Investigación en Energía Eólica.

A partir de una descripción general del equipo, se centra la exposición en la forma como se han calculado los esfuerzos cortantes a lo largo del aspa.

Tomando como base que para el diseño de un aerogenerador, el punto de partida siempre será la evaluación de las necesidades de servicio: potencia requerida, calidad de la energía a entregar, etc., este proceso tiene como complemento el estudio de vientos de la zona de trabajo, de donde se obtiene el tamaño macro de la má-

quina: número de aspas, velocidad de rotación, tamaño de las aspas, perfil a utilizar, etc.

El diseño mecánico propiamente dicho, ha partido de la información anterior, y dividiendo la máquina en sistemas, tal como se observa en la figura 1, permite definir objetivos para cada uno de ellos.



SISTEMAS

- 1- Aspas
- 2- Rotor
- 3- Regulador de velocidad
- 4- Freno
- 5- Transmisión
- 6- Yaw
- 7- Torre
- 8- Generador eléctrico

Figura No. 1. Sistemas que conforman un aerogenerador.

SISTEMA DEL YAW.

Se menciona inicialmente este sistema por ser el soporte principal de todo el conjunto.

Además cumple con las siguientes funciones generales: permite el giro de la máquina alrededor de su eje vertical, orientándose por sí mismo al cambiar la dirección del viento; sirve como medio de unión entre el aerogenerador y la torre.

Para su diseño y cálculo, se deben tener en cuenta las fuerzas que se presentan en todos y cada uno de los demás sistemas, evaluadas bajo condiciones de borrasca (velocidad del viento de 20 m/s):

- Sobre las aspas, consideradas para este caso como cuerpos rígidos, actúan las fuerzas de empuje y arrastre producidas por el viento, las fuerzas de inercia originadas por su movimiento de rotación, las fuerzas giroscópicas producidas por el cambio en la dirección del viento y la acción de sus masas.
- Sobre el rotor actúan las fuerzas de apoyo de las aspas y su propio peso. Las cargas originadas por el sistema de regulación de velocidad son despreciables frente a las demás fuerzas que actúan en el rotor.
- Además se deben considerar los pesos y torques producidos por la transmisión, el generador y el sistema de freno.

SISTEMA DE TRANSMISION

Se compone de un eje el cual recibe la potencia generada por las aspas a través del rotor, que está montado por un extremo. Por el otro extremo entrega esta potencia a la caja de engranajes, la cual va acoplada al generador de energía eléctrica. El eje está apoyado sobre dos rodamientos de contacto angular autoalineables, montados sobre manguitos de fijación para evitar cambios de sección en el eje; también sobre este eje de toma de potencia va montado el sistema de freno hidráulico del molino.

El diseño y cálculo del eje se ha hecho de acuerdo a los métodos típicos que parten de las cargas que actúan sobre él, se hace el cálculo estático y se recalcula por fatiga para obtener el material y las dimensiones finales.

La caja de engranajes se consideró como un elemento comercial el cual se seleccionó de acuerdo al catálogo del fabricante, tomando como parámetros la potencia y el par a transmitir.

ASPAS

La experiencia obtenida hasta ahora, nos indica que el diseño de las aspas presenta un alto grado de dificultad ya que son elementos estructurales esbeltos, que deben satisfacer unos requerimientos aerodinámicos muy precisos y sobre los cuales la teoría no es muy desarrollada. Es por estas razones por las que este tema ha centrado la atención en lo que a diseño se refiere.

El procedimiento seguido parte de los criterios básicos contemplados en los métodos de Lysen, de Paor, y particularmente el método de Jansen y Smulders. A nivel interno se han desarrollado las siguientes herramientas:

- Un método de análisis propio, o método de la Universidad Nacional¹, el cual desarrolla el procedimiento propuesto por Ian Buehring y lo combina con el factor de Prandtl para establecer las pérdidas en la punta del aspa, buscando maximizar el coeficiente de potencia.
- Un programa de computador, denominado SCEE, el cual permite hacer un prediseño global del aerogenerador usando algunos de los métodos expuestos.
- Un programa de computador mediante el cual se pueden calcular las fuerzas y los momentos internos que se presentan a lo largo del aspa.

Para el caso particular de las aspas del Proel 5 se tomaron los siguientes parámetros iniciales:

Velocidad promedio del viento: $V_{\infty} = 8$ m/s.

Número de aspas $B = 3$

Perfil NACA 4412

Angulo de ataque $\alpha = 6^\circ$ (para $R_{crit} = 1.64E5$ y $C_L = 0.9$)

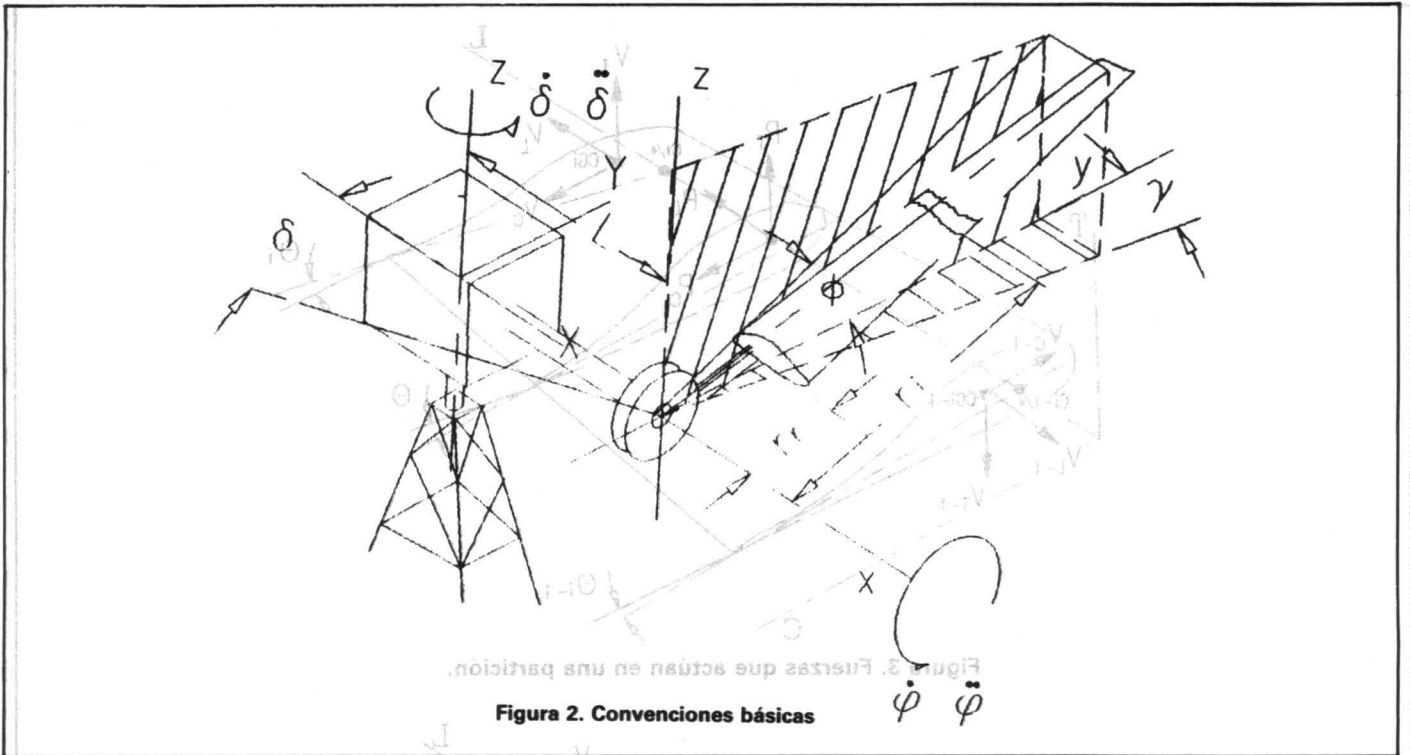
Potencia a la salida $P = 5000$ w

Relación de velocidades de diseño $\lambda = 8$

Para el cálculo de las fuerzas y los esfuerzos en el aspa se definen las siguientes convenciones básicas², con la ayuda del esquema presentado en la figura 2:

- ángulo de cono γ ,
- ángulo de posicionamiento angular del aspa ϕ
- ángulo de derrape δ , (Es el ángulo que forma la dirección del viento con el eje del rotor),
- velocidad y aceleración angulares del rotor ϕ y $\dot{\phi}$, respectivamente.
- velocidad y aceleración angulares del yaw δ y $\dot{\delta}$, respectivamente.
- velocidad relativa del viento ω ,
- radio de raíz r_r ,
- radio total del aspa r_t ,
- brazo del yaw al centro del rotor L ,
- número de particiones N ,

1. Ver Ahumada y Trujillo
2. Ver Ramírez y Peña



- sistema coordenado absoluto X Y Z, solidario con el eje del yaw,
- sistema coordenado relativo x y z, con origen en el centro del rotor.

$$T = \text{sen}\phi \vec{j} - \text{cos}\phi \vec{k}$$

$$\vec{A} = \text{cos}\phi \vec{i} - \text{cos}\phi \text{sen}\gamma \vec{j} - \text{sen}\phi \text{sen}\gamma \vec{k}$$

Una vez se tienen definidos estos parámetros, se realiza un análisis dinámico (cinemático y cinético) de un punto del aspa para conocer cual es su aceleración absoluta. Al aplicar las ecuaciones para movimiento relativo, se llega a que esta aceleración tiene como expresión general:

$$AA = -1 [\delta^2 L + \delta^2 r \text{sen}\gamma - \delta r \text{cos}\phi \text{cos}\delta - 2\delta\dot{\phi} r \text{cos}\gamma \text{sen}\phi]$$

$$+ \vec{j} [\delta L - \delta^2 r \text{cos}\phi \text{cos}\delta + \delta r \text{sen}\gamma - \phi^2 r \text{cos}\gamma \text{cos}\phi - \phi r \text{cos}\gamma \text{sen}\phi]$$

$$+ \vec{k} [-\phi^2 r \text{cos}\gamma \text{sen}\phi + \phi r \text{cos}\gamma \text{cos}\phi]$$

Al considerar los efectos totales sobre una partición, se presentan fuerzas y momentos externos que originan sus respectivas reacciones internas, tal como se observa en las figuras 3 y 4, donde:

- P_T, P_L y P_C , son las componentes de las fuerzas externas expresadas en las direcciones tangencial, longitudinal y de la cuerda.
- L_C, L_L y L_C , son las componentes de los momentos externos expresados en las mismas direcciones anteriores.

Aplicando el principio de D'Alambert

$$\sum F - m\vec{a} = 0$$

Con esta expresión, se pueden calcular las fuerzas generadas por el movimiento que actúan sobre un punto particular del aspa en las direcciones de los ejes móviles x,y,z. Sin embargo como se busca conocer las fuerzas que actúan sobre el aspa y que producen esfuerzos de tensión, compresión, flexión y torsión como un paso necesario para su diseño y cálculo, se hace indispensable contar con la posibilidad de convertir esta expresión vectorial en tres direcciones definidas sobre el aspa: longitudinal en la dirección del eje del aspa; cuerda colineal con la cuerda en la estación estudiada y tangencial, perpendicular a las dos anteriores.

Se pueden evaluar las fuerzas en toda la longitud del aspa, desarrollando las siguientes sumatorias:

- en la dirección C:

$$\sum_{i=1}^n P_{C_i} + V_{C_n} - V_{C_0} - \sum_{i=1}^n (m_i \cdot a_i) = 0$$

- en la dirección L:

$$\sum_{i=1}^n P_{L_i} + V_{L_n} - V_{L_0} - \sum_{i=1}^n (m_i \cdot a_i) = 0$$

La equivalencia entre los vectores unitarios de estos sistemas es:

$$\vec{L} = \text{sen}\gamma \vec{i} + \text{cos}\gamma \text{cos}\phi \vec{j} + \text{cos}\gamma \text{sen}\phi \vec{k}$$

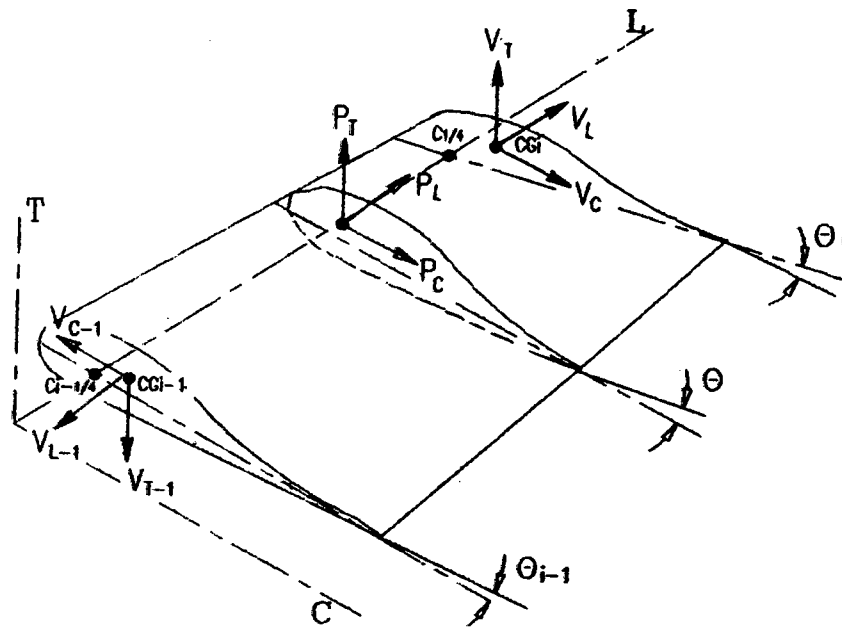


Figura 3. Fuerzas que actúan en una partición.

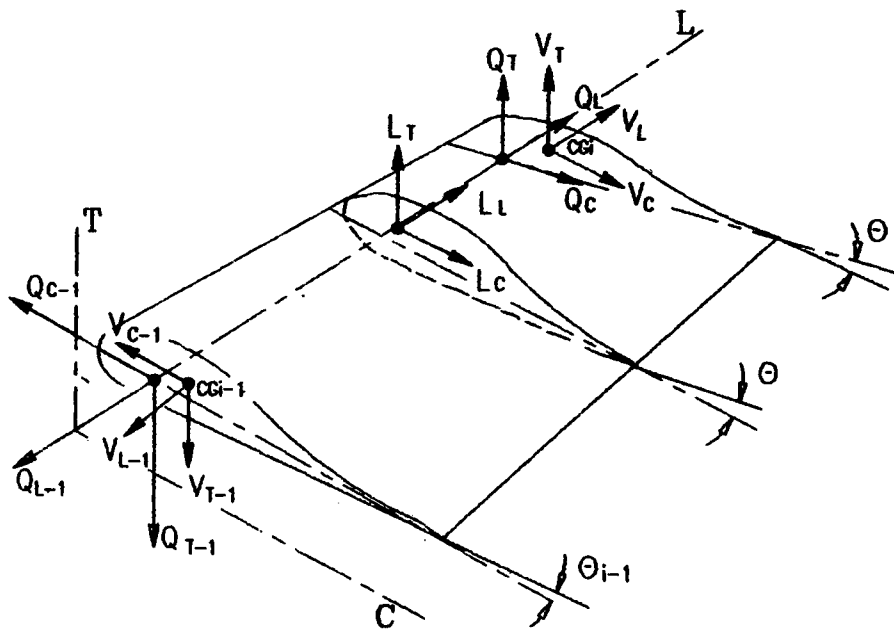


Figura 4. Momentos que actúan sobre una partición.

- en la dirección T:

$$\sum_{i=1}^n P_{T_i} + V_{T_n} - V_{T_0} - \sum_{i=1}^n (m_i \cdot a_i) = 0$$

Como resultado inmediato se pueden evaluar las reacciones en el apoyo del eje del aspa, es decir, las fuerzas que se presentan en la unión del aspa con el rotor.

Para trabajar con los momentos, se usará la relación cinética:

$$\sum \vec{M} = \frac{dH}{dt}$$

donde dH/dt es la variación del momento cinético respecto al tiempo.

Los momentos internos presentes en cada partición se pueden evaluar al calcular iterativamente cada una de las siguientes expresiones, en cada dirección de referencia:

- en la dirección C:

$$Q_{C_i} = -L_{C_i} + Q_{C_{i-1}} - 1/2d_r(V_{T_i} + V_{T_{i-1}}) + V_{L_i} \cdot a_{T_i} - V_{L_{i-1}} \cdot a_{T_{i-1}} + |H_{C_i}|$$

- en la dirección L:

$$Q_{L_i} = -L_{L_i} + Q_{L_{i-1}} - V_{C_i} \cdot a_{T_i} + V_{C_{i-1}} \cdot a_{T_{i-1}} + V_{T_i} \cdot b_{C_i} - V_{T_{i-1}} \cdot b_{C_{i-1}} + |H_{L_i}|$$

- en la dirección T:

$$Q_{T_i} = -L_{T_i} + Q_{T_{i-1}} + 1/2dr(V_{C_i} + V_{C_{i-1}} + V_{C_{i-2}}) - V_{L_i} \cdot b_{C_i} + V_{L_{i-1}} \cdot b_{C_{i-1}} |H_{T_i}|$$

Con la información así obtenida se procede a calcular los esfuerzos que actúan a lo largo del aspa. Se parte de considerarla como una viga empotrada sometida a cargas transversales que originan esfuerzos en toda su longitud, posteriormente se combinan con los esfuerzos de tensión y/o compresión para obtener el estado de esfuerzos principales.

En este artículo sólo se reseñará brevemente el desarrollo para el cálculo de los esfuerzos cortantes.

Como punto inicial se trabaja con la teoría básica de Esfuerzos Cortantes en Elementos de Pared Delgada, teniendo en cuenta que para el presente caso **no se tiene un elemento de revolución, en cambio si es de sección variable, tanto en su geometría como en su posición en el espacio**, es decir, la ecuación:

$$T_{prom} = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t}$$

se debe modificar para introducir las variaciones de:

- momento de inercia de cada partición
- del momento de primer orden de cada partición Q_i ,
- de la fuerza cortante que actúa en cada partición V_i .

Para conseguir este objetivo fue necesario desarrollar rutinas dentro del programa general, que al efectuar las sumatorias en toda la longitud del aspa permite obtener los valores deseados en cada punto.

Como se trata de evaluar los esfuerzos que se producen en cada sección es conveniente definir un sistema coordinado con dirección propia para cada partición, se eligieron las siguientes direcciones:

- Stage que coincide con la dirección de la cuerda de la partición.
- Uper, perpendicular a la anterior, tal como se observa en la figura 5.

Con referencia a estas direcciones, las componentes de esfuerzo cortante vienen dadas por:

$$T_{upc} = \frac{(V_t \cdot \cos\theta + V_c \cdot \sin\theta) \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot U_{pci}}{(I_{stage} - (A \cdot (0.223 \cdot c)^2)) \cdot t}$$

$$T_{stc} = \frac{(V_c \cdot \cos\theta - V_t \cdot \sin\theta) \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot Stc_i}{(I_{uper} - (A \cdot (0.027 \cdot c)^2)) \cdot t}$$

A manera de conclusión se presenta la siguiente gráfica en la cual se resumen los valores de los esfuerzos cortantes en toda la longitud del aspa.

ROTOR

Para su diseño se han tomado como base las fuerzas y momentos originados por las aspas. Además se han incluido los efectos que sobre esta pieza presenta el sistema de regulación de velocidad.

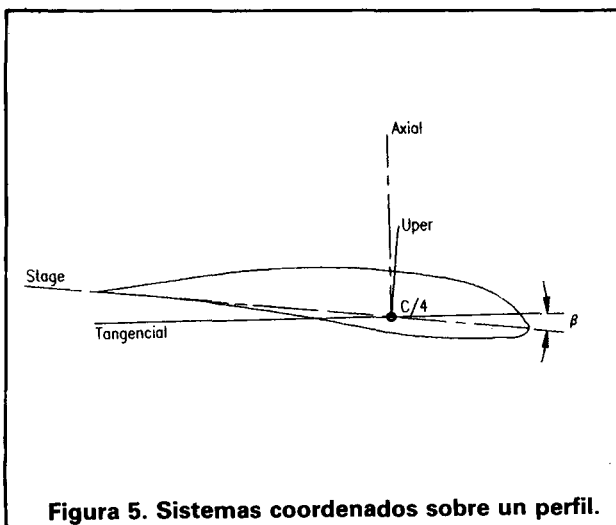
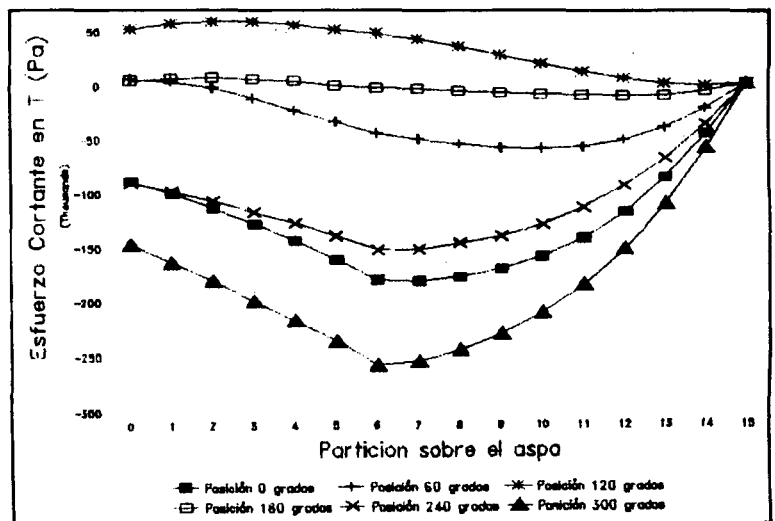


Figura 5. Sistemas coordinados sobre un perfil.



SISTEMA DE GENERACION

Está en desarrollo. El principal problema que se ha encontrado es no contar con generador trifásico que

entregue corriente de frecuencia constante con variación de las revoluciones del rotor.

Se está trabajando en un circuito de control que permita ofrecer corriente con poca variación de frecuencia, aún cuando la variación de la velocidad angular del aerogenerador sea considerable.

INSTITUTO DE ENSAYOS E INVESTIGACION

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Sede: Santafé de Bogotá - D.C.

Presta servicios de Asesoría, Consultoría, Investigación y Ensayos.

Laboratorios de:

Ingeniería Eléctrica
Ingeniería Química
Ingeniería Agrícola
Ingeniería Mecánica
Ingeniería de Sistemas
Ensayo de Materiales
Metalurgia
Ingeniería Ambiental e Hidráulica

El I.E.I., es conocido en todo el país y goza de un enorme prestigio.

Ha prestado servicios, de ensayo y asesoría a múltiples empresas del sector público y privado.

Es tenido en cuenta para el control de calidad de los productos nacionales.

Es reconocido como árbitro calificado en los conflictos técnicos en el campo de la Ingeniería.

Es la imagen externa de la Facultad de Ingeniería.

DIRECTOR: Ing. Javier Barona Palacios

Dirección: Universidad Nacional de Colombia Santafé de Bogotá, D.C.

Tel: 268-87-86 Fax: 2225396 A.A. 5885