

DESARROLLOS E INNOVACIONES TECNOLÓGICAS, PARA TURBINAS EÓLICAS DE MULTI MEGA WATTS

Lassig J¹, Aparcian A¹, Mesquida C¹, Labriola C¹, Colman J²

¹ Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería; Buenos.Aires 1400 – (8300) Neuquén, Te: 54-299-4490322

² Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Universidad Nacional de La Plata, Calle 48 y 116 (1900) La Plata, Te. 54-221-423 6679

Para revertir el cambio climático por el aumento de los gases de efecto invernadero de origen antropológico, es necesario plantear innovaciones tecnológicas que cambien máquinas, sistemas y procesos que emiten ese tipo de gases, por otras máquinas, sistemas y procesos que no los produzcan. En el rubro generación eléctrica, la energía eólica tiene esas características. En la actualidad a nivel global aporta tan solo el 1% de la producción mundial de energía. Esto podría revertirse si se logran desarrollar turbinas eólicas del orden de los 20-30MW de potencia nominal. El presente trabajo hace un recorrido por las limitantes tecnológicas para alcanzar este logro, y describe algunos desarrollos innovadores que podrían plasmarse en los futuros aerogeneradores con potencias superiores a los 10MW.

INTRODUCCION

La generación de electricidad a partir del viento no produce gases tóxicos, ni contribuye al efecto invernadero, ni destruye la capa de ozono, tampoco crea lluvia ácida. No origina productos secundarios peligrosos ni residuos contaminantes. Por lo tanto es una fuente de energía limpia que no aporta al calentamiento global.

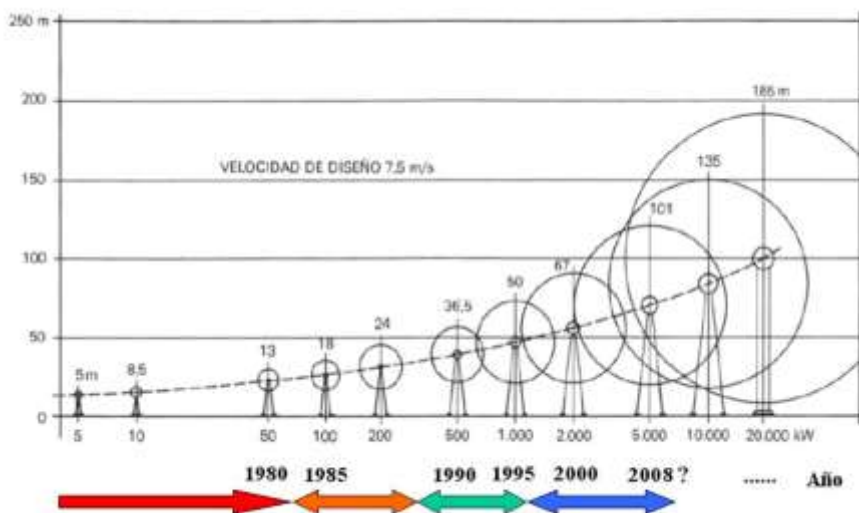


Figura 1:
Potencia generada en función del diámetro del rotor, altura del eje y evolución histórica.

El desarrollo tecnológico de este tipo de energía estuvo condicionado a las crisis petroleras (1973, 2002,

etc).

Se puede apreciar la evolución histórica y tendencia, del tamaño y la potencia de las turbinas eólicas a través de la siguiente figura.

La evolución tecnológica del rotor y la palas de las turbinas eólicas en las últimas dos décadas del siglo pasado, están bien descriptos por J.L.Tangler [1, 2000].

En la actualidad se está intentando desarrollar aerogeneradores Multi Mega Watt del orden de los 5 MW, aunque pareciera ser este un límite con la actual tecnología según varios investigadores, unos indicando que con el aumento del diámetro de los rotores, las tensiones desarrolladas en las palas están en el límite de los actuales materiales en uso, como Hiller et all [2, 2007]. Por otra parte, este aumento en el diámetro también produce un aumento de peso tanto del rotor como del generador eléctrico, y la tecnología de torres debería pasar de tubos de acero a torres de hormigón pre-tensado según Reinhard et all [3, 2007], u otras tecnologías. Por lo que para pasar a tamaños mayores, se deberá rever las tecnologías a utilizarse, no solo en nuevos materiales, generadores eléctricos, sistemas, y aerodinámica. A continuación se describen algunas tendencias de innovación en las cuatro áreas mencionadas.

MATERIALES

La altura de las torres está asociada a la capacidad de las turbinas. Mayor potencia implica un rotor de mayor diámetro y en consecuencia una torre más alta.

Inicialmente las torres de las turbinas eólicas se construyeron con reticulados de acero, que aun se siguen utilizando en algunos casos para generadores de baja potencia. Para aerogeneradores de gran potencia, una estructura reticulada en toda su altura es prácticamente inviable. El principal inconveniente técnico, radica en la complejidad de su ensamblaje y posterior montaje. Se requiere abulonar cientos de uniones, contar con el espacio necesario para hacerlo, y transportar las secciones desde el campo de ensamblaje hasta el lugar de emplazamiento, lo que se complica enormemente en tierras complejas. Estructuralmente, los nudos son susceptibles a la corrosión y las diagonales son muy sensitivas a las cargas de viento. Por otro lado, han dejado de usarse por motivos estéticos y de contaminación visual.



Figura 2:

Montaje de una torre tubular para turbina eólica moderna.

Las torres de acero tubulares reemplazaron a las anteriores debido a su atractivo diseño y a la facilidad de su montaje. Las más usuales son de forma levemente cónica, con el diámetro y el espesor de la pared aumentando gradualmente hacia la base. Constan de dos o tres segmentos prefabricados, que están preparados para ser ensamblados in situ con un sistema de pletinas y bulones. El diámetro, longitud y peso de los segmentos están acotados por la factibilidad de su transporte, siendo los valores máximos típicos de 4,3 m para el diámetro, 60 toneladas para el peso y aproximadamente 25 m de longitud.

Se están considerando nuevos diseños de las uniones para el ensamblaje de los módulos. Uno de ellos es a través de uniones friccionantes, con largas perforaciones acanaladas. Estas uniones se dimensionan para resistir las fuerzas de tracción inducidas por las cargas de diseño. Según Veljkovic y Husson, la innovación aumenta al doble la resistencia a la fatiga de las uniones. [4, 2009].

Como en todas las estructuras esbeltas de sección circular solicitadas por viento, estas torres son vulnerables a la fatiga. Cuando el viento fluye a través de las mismas, la curvatura de la sección ocasiona la separación de la capa límite a sotavento, generando un desprendimiento regular de vórtices. Estos vórtices producen una fuerza periódica sobre la torre en dirección perpendicular al viento incidente. Si la torre tiene bajo amortiguamiento y la frecuencia de desprendimiento de vórtices coincide con la frecuencia natural de la estructura, se producen vibraciones de alta amplitud que ocasionan daños por fatiga y pueden conducir al colapso. Este fenómeno es bien conocido y ha sido estudiado durante muchos años, si bien aun no se ha encontrado un método exhaustivo para cuantificar las amplitudes de desplazamiento de la estructura.

Para estudiar la estabilidad de las torres se realizan ensayos en túnel de viento, modelizaciones en CFD y mediciones a escala real. A raíz de estos estudios, se ha comprobado que a partir de los 85 m, las torres de acero presentan inestabilidad lateral, por lo que no serían viables para turbinas multi-mega.

En ese caso Harte y Van Zijl [5, 2007] proponen las torres de hormigón pretensado, que se construyen con las mismas técnicas de encofrado utilizadas en las chimeneas y torres de enfriamiento industriales. El problema que puede presentarse en el hormigón es debido a su coeficiente de dilatación térmica. Las variaciones de temperatura pueden originar fisuras en la estructura, debilitando al material en ciertas zonas y consecuentemente reduciendo su rigidez. Estas cargas térmicas se consideran en el cálculo de la torre combinándolas con las demás solicitaciones estáticas y dinámicas a las que está expuesta.

Actualmente se están investigando numérica y experimentalmente soluciones tecnológicas para disminuir el riesgo de fatiga en las torres de acero y hormigón, que tienden al control pasivo o activo de las vibraciones. Entre los métodos de control pasivo más comunes Kumar, Sohn y Gowda [6, 2008] mencionan:

- El aumento de la amortiguación de la estructura mediante la colocación de juntas de materiales visco elásticos entre los miembros estructurales.
- La rigidización de la estructura para aumentar su frecuencia natural y evitar la resonancia.
- La modificación de la sección transversal de la estructura, colocando distintos tipos de dispositivos para llevarla a una forma aerodinámica que evite el desprendimiento de vórtices.
- Chapa helicoidal alrededor de la torre para afectar la capa límite evitando el desprendimiento de vórtices.
- Carenado perforado. Básicamente consisten en una malla cilíndrica metálica agujereada que se coloca alrededor del cilindro principal sosteniéndola con puntales.
- Colocación de cables enrollados helicoidalmente alrededor de la estructura, evitando la formación de vórtices en la zona de estela. Este método tiene la ventaja de reducir el arrastre además de las vibraciones.
- La modificación de la rugosidad superficial de la torre colocando carenados que modifican la separación de las líneas de flujo.

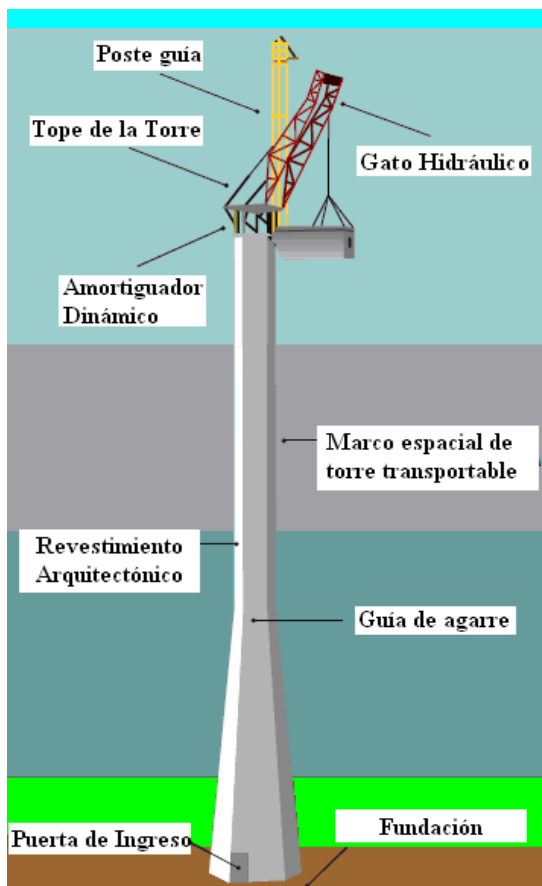


Figura 3:

Sistema de armado modular de la torre, en materiales compuestos realizado por Wind Tower Systems.

Para longitudes mayores a 100m, distintas empresas europeas están desarrollando torres híbridas de hormigón premoldeado y acero. Estas torres se componen de segmentos de hormigón premoldeado de alta resistencia en la parte inferior y secciones tubulares de acero en la superior. La parte de acero se ancla sobre el hormigón mediante uniones abulonadas. Además de la usual sección transversal circular, se construyen con secciones cuadradas o triangulares con las aristas redondeadas. Los segmentos inferiores se montan sobre fundaciones de hormigón. Para lograr la rigidez necesaria en la punta de la torre, se requieren diámetros mayores a 4 metros en la base. Esto dificulta el transporte de los segmentos de hormigón, por lo que generalmente son fabricados en el lugar de emplazamiento, utilizando hormigón elaborado in situ y pretensando toda la estructura con la ayuda de tensores externos. Las secciones superiores pueden ser transportadas en vehículos convencionales. Con estas estructuras de fácil montaje y mantenimiento, pueden lograrse adecuadas frecuencias para evitar la resonancia con la excitación producida por el viento.

Malcom [7, 2004] estudio otros tipos de torres híbridas, por ejemplo combinando secciones tubulares de acero, con reticulados y tensores de acero.

Otra innovación en estudio es el desarrollo de un sistema modular de armado de torre utilizando materiales compuestos (carbón-carbón) que reducen el peso de la torre, pudiendo resistir tanto cargas estáticas como dinámicas [8, 2011].

GENERADORES ELÉCTRICOS

La tecnología en los sistemas de generación eléctrica ha evolucionado drásticamente en la última década con el propósito de reducir peso y volúmenes para ser izados a las góndolas cada vez más altas de las turbinas eólicas en procura de mayor potencia instalada por unidad.

Inicialmente en el mercado se usaron las máquinas más simples y nobles que son las asincrónica o de inducción. Estas tenían un sistema de cambio del número de polos, así en bajo régimen de viento (6 á 7m/s) la máquina daba un cuarto o un tercio de la potencia nominal a la velocidad de diseño (10 á 12m/s). Estamos hablando de las máquinas de la década de los 1990s que eran de 400 á 700kW.

A fines de los 1990s la escalada fue pasar el MW de potencia por turbina. Las primeras fueron las NEG de 1MW que además constituyeron la primera granja off shore con 4MW instalados en un *polder* en Holanda. En 1997 NEG es comprada por MICON, el mayor instalador de turbinas Danés.

Paralelamente a esta tecnología de generadores, a fines de los 1980s y durante los 1990s ENERCON fue perfeccionando su sistema de generación síncrona de frecuencia variable con el viento que luego era convertido a CC y con inversores restablecido a CA de frecuencia fija. Este sistema elimina la caja multiplicadora ya que el generador síncrono es multipolar. Por esta razón el generador tendrá que soportar los embales del viento y por eso el generador se diseña al doble de la potencia nominal que se certifica en el molino. A pesar de ello, se han dado varios casos de incendio del generador con esta tecnología. Para fines del siglo XX aparecieron turbinas de 2 MW

Figura 4:

Parque eólicos off shore.



A partir de dichos tipos de generadores y sus accesorios se plantearon mejoras en los mismos. Para el caso de los asincrónicos VESTAS que había comprado a NEG-MICON, desarrolló el sistema OPTISPEED [9, 2005] que es un afinamiento con realimentación electrónica-eléctrica del sistema Stall ya que este una vez llegada a la potencia nominal, tenía unas variaciones a medida que la velocidad del viento crecía. De esta manera la máquina con un rotor bobinado se le inyectaban corrientes trifásicas en el rotor para mantener una velocidad constante y potencia de salida constante por el efecto del deslizamiento. Este refinamiento se desarrolló durante fines de los 1990s y ha sido de amplia aplicación a partir del 2000 ya que Vestas prácticamente domina el 40% del mercado internacional.

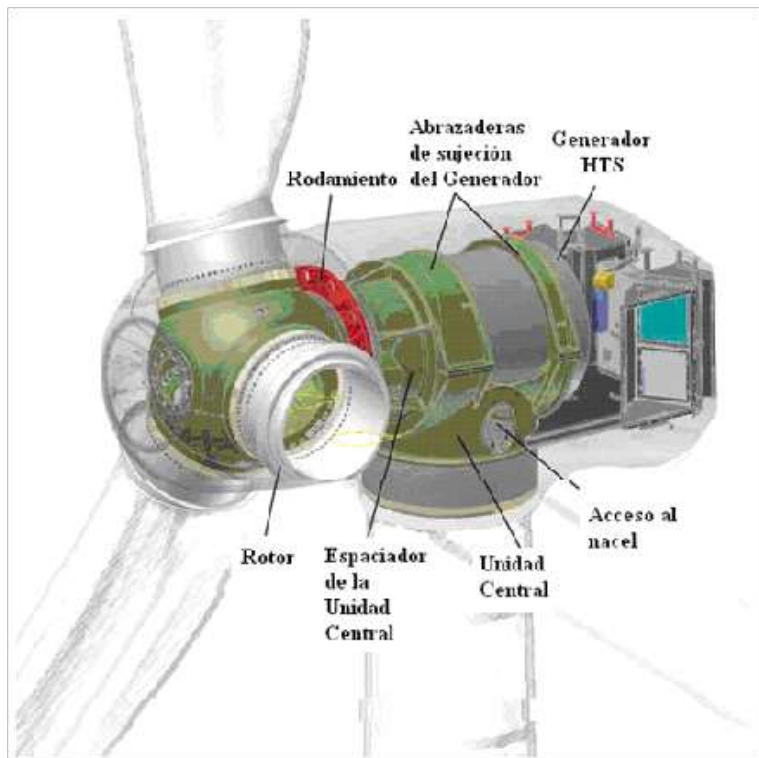


Figura 5:

Dibujo esquemático de la futura turbina eólica SEA TITAN de 10 MW (extraído de la referencia 10).

También a fines del siglo XX, ABB plantea turbinas de más de 2MW con sistema ENERCON pero con excitación rotórica mediante imanes permanentes. Estos imanes deberían ser de Neodimio que poseen un tamaño tres veces menor que los cerámicos y dan 1,5 veces más de magnetismo. Pero todavía en el 2000 no se había solucionado su desmagnetización por calentamiento ya que la temperatura de Curie era muy baja (80°C) y la temperatura normalizada de operación de las máquinas eléctricas es de 75°C.

Para el 2005 se solucionó ese problema y aparecieron en el mercado una familia de imanes de Neodimio con TC del orden de 120°C. Esto permitió que IMPSA desarrollara su turbina eólica con tecnología similar a ENERCON pero con excitación de IP obteniendo máquinas con 2MW de Potencia.

En el 2008 aparecieron prototipos de turbina eólica de 3MW que en el presente ya se comercializan.

Actualmente existen proyectos para construir prototipos de 6 y 8MW con la última tecnología.

Por último, para el caso de las máquinas asincrónicas, en EEUU se desarrollan en el MIT unas máquinas síncronas superconductoras por encargo de la Marina de los EEUU para propulsión de naves Guarda Costas [10, 2011]. Esto permite reducir tamaño y peso con el uso de superconductores de alta temperatura que trabajan a la temperatura del N₂ líquido (-130°C) en vez de la del helio líquido (-270°C). Este adelanto tecnológico permitió que durante 2009-2010 se desarrollara un prototipo de turbina eólica de 10MW con la posibilidad de ampliar a 30MW de generación por turbina.

SISTEMAS DE CONTROL Y REGULACIÓN

En la actualidad la regulación de potencia se hace fundamentalmente a través de la aerodinámica de las palas, ya sea por el diseño de entrada en pérdida (Control Stall) de parte de las mismas o por la posibilidad de mover cada pala variando así el paso aerodinámico de ellas (Control Pitch). En los aerogeneradores de mediana potencia también se utilizan dispositivos aerodinámicos como frenos y spoilers para lograr el con-

tol y la regulación. Como se mencionó en la sección anterior, también existen variantes combinadas aerodinámicas-eléctricas para lograr este control.

Algo innovador para regular o controlar la velocidad de rotación del aerogenerador en función del viento, será usar frenos con fluidos magnetoreológicos (FMR) que puedan controlar la velocidad de giro del rotor del aerogenerador, y amortiguar y/o regular la orientación del mismo ante las componentes turbulentas del viento. Todo esto mediante la aplicación de campos magnéticos sobre el FMR.

El estudio de nuevos materiales puede orientarse hacia dos ramas: los materiales inteligentes, cuya respuesta es proporcional al estímulo externo, y los nanos materiales, cuya estructura microscópica está diseñada específicamente. Los fluidos magnéticos presentan ambas cualidades, dado que los mismos son diseñados y su respuesta es proporcional a la excitación externa y de la manera deseada.

Se denominan fluidos magnetoreológicos (FMR) a aquellos fluidos compuestos por partículas ferromagnéticas, de tamaño nano o micrométricas, dispersas en un líquido portador, que poseen propiedades viscoelásticas controlables mediante campos magnéticos externos [11, 2005], [12, 2006].

La proporción y calidad de los componentes de una emulsión, suspensión o dispersión, junto con el protocolo de creación de la misma, se ha indagado hasta el presente mediante exhaustivas experimentaciones [13, 2005], [14, 2005].

Numerosas aplicaciones se han propuesto para los fluidos magnetoreológicos, desde embragues y amortiguadores [15, 2007], válvulas [16, 2005] y sellos hasta aplicaciones biomédicas [17, 2005] en las cuales al fluido MR se lo trata como un film o una espuma.

Otra aplicación en estudio es el diseño de dispositivos de freno líquido con FMR, cuya característica de disipación sea variable.

Para cada aplicación particular, debe desarrollarse un FMR que responda a todas las necesidades, de la mejor manera posible, para las cuales el fluido es diseñado.

Entre las características que se pueden buscar en un fluido magnetoreológico, podemos enunciar: mayor tiempo de sedimentación posible, alta perdurabilidad de las propiedades físico-químicas, alta estabilidad (no agregación en ausencia de campos magnéticos externos), viscosidad acorde a la aplicación, grado de agregación por campo magnético externo según la aplicación, bajo magnetismo remanente, alta reversibilidad, alta susceptibilidad magnética, químicamente inerte, económico y liviano.

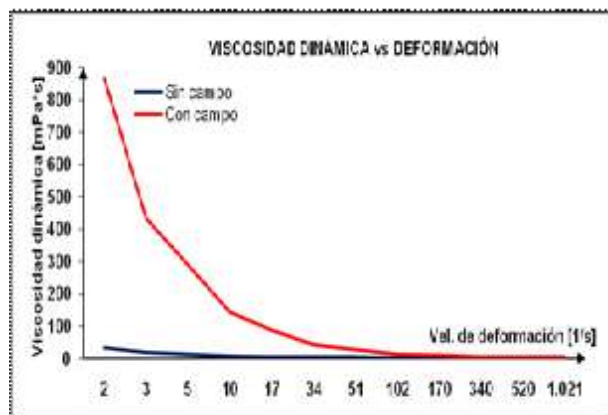


Figura 6: Esfuerzo cortante τ versus velocidad de deformación dy/dt .



Figura 7: Viscosidad dinámica μ versus velocidad de deformación dy/dt .

Es importante, en el diseño de un FMR, caracterizar el campo magnético, cualitativa y cuantitativamente, y la emulsión. En la Figura 6 puede verse la variación del esfuerzo cortante versus la velocidad de deformación impuesta al fluido. La pendiente de las curvas es representativa de la viscosidad del fluido. Se observa que para velocidades de deformación entre 2 s^{-1} y 102 s^{-1} (1rpm-60rpm), el esfuerzo cortante en presencia del campo crece entre 5 y 14 veces frente a la misma emulsión en ausencia de campo magnético externo. La emulsión presenta un comportamiento pseudo plástico, independientemente de la presencia del campo [18, 2010]. La Figura 7 presenta resultados de mediciones de viscosidad dinámica versus velocidad de deformación [18, 2010]. Se aprecia el notable incremento de la viscosidad de la emulsión en presencia del campo. El orden del incremento oscila entre 8 y 25 veces.

La elección de los elementos es crucial. Elegir un aceite de baja viscosidad refleja mayores efectos magnetoreológicos y por ende, menores pérdidas por rozamiento a la hora de construir un freno. Esto redundaría en

un menor gasto de energía para generar el campo magnético. Por otra parte la distribución en el espacio y la intensidad del campo magnético influye notablemente sobre los resultados.

Resumiendo, los aerogeneradores producen corriente eléctrica que son función de la velocidad de giro del generador eléctrico, que a su vez depende de la intensidad del viento, entonces si aumenta la corriente eléctrica y esta la realimento en un campo magnético que actúa sobre un ferrofluido, este incrementa su viscosidad y pudiendo reducir (frenar) la velocidad del rotor eólico, y así controlarlo.

AERODINÁMICA

Desde el punto de vista de la aerodinámica de las palas de rotores, la búsqueda de la mayor eficiencia depende, fundamentalmente, de dos factores: el mejor diseño aerodinámico posible y la reducción del peso de las mismas.

Respecto del peso, hay muchos intentos en reducirlo, como por ejemplo el de construir aspas biplanas [19, 2007].

Otro camino, en la búsqueda del mejor diseño aerodinámico, es tratar de producir más potencia a igual tamaño, mereciendo citar en esa línea de trabajo las investigaciones de Jeppe Johansen and Niels N. Sørensen [20, 2006] consistentes en colocarles en el extremo de la punta de pala dispositivos winglets.

Esta problemática, la de la optimización aerodinámica, resulta muy compleja de tal manera que los investigadores no pueden resolver todos los problemas aerodinámicos juntos, vinculados a las palas de los rotores, a saber: perfiles aerodinámicos más adecuados; evolución de los mismos a lo largo del radio de la pala, es decir, cálculo y optimización de la “planta alar” de la/s palas; comportamiento de las mismas ante grandes ángulos de ataque (cuestión que se da en más del 80% del tiempo en que el viento al soplar mueve las mismas); peso y distribución del mismo según el radio; resistencia estructural; turbulencia del viento, con características locales importantes (no es lo mismo en llanura que a sotavento o barlovento de sierras o montañas); etc.

En todo ese complejo contexto, los investigadores han sabido aproximarse a la “solución” de alguno de dichos problemas, a saber, elegir “familias” de perfiles aerodinámicos que presentan adecuadas “polares” (C_l vs. α ; C_l vs. C_d ; $C_{mc/4}$ vs. α ; C_l / C_d), siendo C_l , C_d , $C_{mc/4}$, α los coeficientes de sustentación, resistencia, momento de cabeceo respecto del cuarto de cuerda y ángulo de ataque, respectivamente, y C_l / C_d la *eficiencia aerodinámica*. Precisamente, el *ángulo de ataque* (α) es el ángulo que forma la “velocidad local del viento” en la zona de la pala con la *cuerda* de la misma, siendo esta última la distancia entre el borde de ataque y el de fuga que, en un buen diseño aerodinámico, variará según el radio de la pala, desde un valor relativamente pequeño en el eje del rotor hasta ir incrementándose a medida que se aleja del eje (hasta un cuarto del radio, aproximadamente) para luego ir disminuyendo hasta un mínimo en la punta.

Cuando mencionamos más arriba “adecuadas polares”, nos referimos a las mejores prestaciones aerodinámicas del perfil, su eficiencia aerodinámica, etc, en el rango de velocidades del viento correspondientes a la zona donde se emplazará la *turbina eólica*.

Esta problemática, la de la optimización *aerángulo de ataque* (α) es el ángulo que forma la “velocidad local del viento” en la zona de la pala con la *cuerda* de la misma, siendo esta última la distancia entre el borde de ataque y el de fuga que, en un buen diseño aerodinámico, variará según el radio de la pala, desde un valor relativamente pequeño en el eje del rotor hasta ir incrementándose a medida que se aleja del eje (hasta un cuarto del radio, aproximadamente) para luego ir disminuyendo hasta un mínimo en la punta.

Cuando mencionamos más arriba “adecuadas polares”, nos referimos a las mejores prestaciones aerodinámicas del perfil, su eficiencia aerodinámica, etc, en el rango de velocidades del viento correspondientes a la zona donde se emplazará la *turbina eólica*.

Respecto del ángulo de ataque, precisamente la torsión que caracteriza a cada pala, a lo largo del radio, es para garantizar en lo posible que cada sección transversal de la pala (esto es, normal a la coordenada radial r o su forma adimensional $x = r/R$, siendo R la longitud (radio) de la pala), tenga el *óptimo ángulo de ataque* correspondiente al perfil aerodinámico a usar. Pero este diseño preliminar se basa en presuponer un valor y dirección del viento constantes. Sabemos que el viento turbulento en el que están inmersas las turbinas eólicas y, obviamente, las palas de las mismas, en el mejor de los casos tendrá una velocidad media preponderante en una dirección, pero también ráfagas que pueden alcanzar mayores-menores valores que la media y, además, en direcciones variables. En estas condiciones, como las palas se verán sometidas a ángulos de ataque que cambiarán la mayor parte del tiempo, aunque hayamos cristalizado un muy buen diseño aerodinámico preliminar, las mismas se verán en varias ocasiones en *situación de pérdida* (stall condition). El ángulo de pérdida estática es el ángulo mínimo para el que, en un perfil alar *estacionario* expuesto a una corriente uniforme comienzan a manifestarse los fenómenos de pérdida de sustentación. Partiendo de pequeños ángulos de ataque la sustentación crece normalmente en forma lineal con el aumento del ángulo

de ataque, hasta alcanzar un máximo. A partir de dicho máximo de sustentación, que se corresponde con el máximo ángulo de ataque, si se incrementa ligeramente el mismo, la capa límite sobre el ala (en nuestro caso la pala) se desprenderá (boundary layer separation) y, consecuentemente, disminuirá sensiblemente la sustentación: se trata de la entrada en pérdida. Veamos con detalle el campo de flujo: Partiendo de grandes ángulos de ataque con flujo aún adherido, a medida que sigue aumentando la incidencia comienza a aparecer sobre el borde de ataque del perfil flujo recirculante, formando parte de un vórtice contenido dentro de una corta *burbuja de recirculación*. Mientras este patrón re-circulatorio sea pequeño no producirá apartamientos importantes de la relación lineal sustentación-ángulo de ataque. Pero para ángulos de ataque suficientemente grandes, con tamaños de burbuja de recirculación crecientes se aprecia el comienzo del proceso de separación. Cuando un perfil alar es orientado bruscamente según un ángulo de ataque suficientemente grande con respecto a una corriente puede ocurrir un proceso denominado pérdida dinámica (double stall).

Diferentes tipos de pérdida han sido identificados en el pasado (McCullough & Gault, 1951 [21, 1951]; (McAlister & Carr [22, 1979]; (Currier & Fung [23, 1992]. El tipo de pérdida que más se está estudiando actualmente es el que ocurre a altos números de Reynolds en la región ubicada sobre el borde de ataque de modernos perfiles delgados. (Currier & Fung [23, 1992], Acharya & Metwally [24, 1992], Shih et al. [25, 1992], [26, 1995].

La pérdida de borde de ataque es habitualmente consecuencia de la separación de una capa límite laminar en las cercanías de la nariz del perfil alar. La separación es parte de un proceso fuertemente interactivo en el cual la capa límite se desprende e irrumpe en el flujo en forma de un esbelto chorro de fluido que puede ser considerado como capa de corte. El primero en identificar detalladamente el comienzo de este proceso fue Van Dommelen & Shen [27, 1980], [28, 1982] siendo posteriormente descrito por otros investigadores: Cowley [29, 1983]; Elliott et al. [30, 1983]; Peridier et al. [31, 1991].

Esta problemática del complejo flujo en el entorno de las palas, requiere de parte del investigador y diseñador de las mismas el aporte de ideas que lleven al empleo de dispositivos y/o mecanismos de *control del flujo* sobre las mismas. Por control del flujo entendemos todo dispositivo y/o mecanismo que cambie el patrón de flujo en el entorno y a sotavento de las palas respecto del que se tendría sin dicho mecanismo y/o dispositivo. Esa constituye una de las líneas de investigación y desarrollo más modernas de la mecánica de los fluidos y aerodinámica, en particular, en el rango de los bajos números de Reynolds que es donde se desenvuelven las palas de las turbinas eólicas, tanto las de pequeña y mediana potencia como las más grandes. A los efectos, el número de Reynolds se evalúa con la velocidad media del viento aguas arriba de las palas y la cuerda media de las mismas.

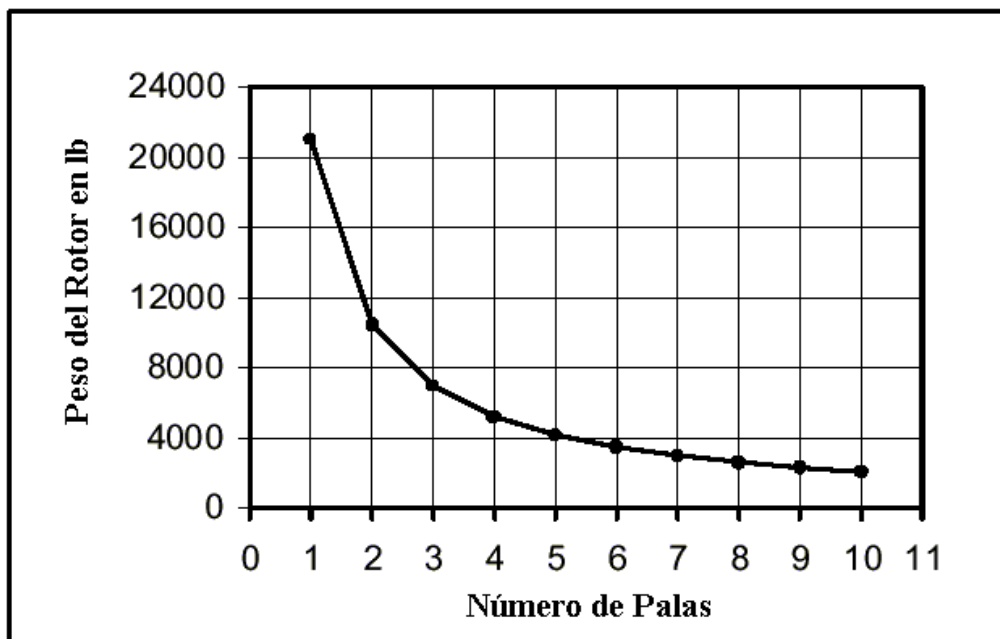
Los dispositivos y/o mecanismos de control de flujo pueden ser *pasivos y/o activos*, necesitando estos últimos el aporte de energía externa para que funcionen [32, 33, 34, 35, 36, 37]. Algunos de los dispositivos empleados de manera pasiva y/o activa son los mini-flaps Gurney, a ubicar en parte de las palas sobre la superficie opuesta a donde incide el viento, cerca del borde de fuga. Con ello se busca incrementar la sustentación y/o retrasar la entrada en pérdida de las mismas. Cuando se recurre a ellos de manera activa, debe proveerse de algún sistema electromecánico y/o electromagnético que permita al mini-flap oscilar verticalmente entrando y saliendo de la pala, en lo posible dentro de la capa límite en la zona cerca del borde de fuga. Las oscilaciones deben “adecuarse” a la estructura de la estela de tal manera que se vea incrementada la circulación alrededor de la pala y, consecuentemente, la sustentación. Conceptualmente, dichos dispositivos logran un leve “corrimiento” de la condición de Kutta (punto de remanso posterior del perfil) hacia la superficie inferior y, con ello, se incrementará la circulación, esto es, la sustentación, con muy poco incremento de la resistencia. Así se alcanzan mayores eficiencias aerodinámicas.

Otra forma, pasiva, de buscar mayor eficiencia aerodinámica es la colocación de pequeñas aletas o “winglets” en las puntas, en un plano vertical o casi vertical al plano medio de la pala. Dichas aletas actúan, desde el punto de vista aerodinámico, en dos fenómenos, a saber: a) Aumentan la envergadura de las palas, es decir, su longitud, y con ello su alargamiento (R^2 / S , donde R y S son la longitud y “proyección” de la pala en un plano, respectivamente); b) Proveen de un “empuje” adicional que se “suma” al que puede efectuar la pala sin el winglet. En la situación a), el aumento del alargamiento va acompañado de una mejora en la eficiencia aerodinámica y, en el b), el aumento del empuje redundará en el incremento del rendimiento de las mismas, pues el torque o reacción seguirá sin cambios significativos.

Si bien el winglet configura una forma pasiva de control de flujo, precisamente al no necesitar de aporte externo de energía lo hace más sencillo de implementar, siendo su mantenimiento prácticamente el mismo que el mantenimiento general que debe hacerse a las palas aunque no tuvieran dicho dispositivo.

Por último, otra forma de reducir el peso de los rotores eólicos, es utilizar más palas con la misma solidez. Cheney [38, 1999] realizó estudios de cómo se reducía el peso del rotor en función del aumento del número de palas. La figura 8 lo ejemplifica.

Figura 8:
Peso del rotor en función del número de palas a igual solidez, extraído de la referencia 38.



Pero no se puede aumentar indiscriminadamente el número de palas, pues el alargamiento de las mismas crece y hace muy esbelta la estructura de las aspas, haciendo imposible (con los actuales materiales) su construcción.

Por lo tanto, con la tecnología actualmente disponible y algunos desarrollos tecnológicos por venir, es posible que las grandes mega turbinas incorporen mas palas en los rotores: 4 ó 5 aspas.

CONCLUSIONES

Realizar turbinas eólicas de más de 10 MW de potencia nominal, hoy en día es todo un desafío. Se necesitaran innovaciones que puedan materializar este objetivo.

Los desafíos están fundamentalmente en la reducción del peso Rotor-Góndola, y esto se podrá logra muy posiblemente con:

- 1) el aumento del número de palas de los rotores,
- 2) el uso de materiales súper conductores en los generadores eléctricos.

El aumento del diámetro de las turbinas eólicas (y su peso) conducen a tener que innovar en el diseño y construcción de las torres. Muy posiblemente en los próximos años veremos torres soporte en hormigón pretensado y otras fabricadas en materiales compuestos.

El control de velocidad y potencia seguramente será cada día mejorado, y una posible innovación será la utilización de nuevos materiales como el caso de los fluidos magnetoreológicos. Como también se verán nuevos dispositivos aerodinámicos sobre las palas (controladores de flujo y vórtices tanto pasivos como activos).

La conclusión que se puede obtener es que, en un futuro cercano se dispondrán de turbinas de 30MW, por lo que la instalación de una súper granja eólica de unos 2100MW de potencia instalada (necesitarían de unas 70 turbinas de 30MW), pudiendo estar operando a los 6 meses la primera turbina, y prácticamente se instalarían a razón de una por semana, podemos decir que en 1,5 á 2 años se instalarán los 2100MW.

Si lo comparamos con el tiempo de instalación de generación térmica de ciclo combinado (necesitará 4 años en instalarla) y centrales Hidráulicas grandes (5años) a un precio similar por MW instalado, hace muy competitiva la tecnología eólica sobre las demás tradicionales.

Aunque subsistirá el problema de la imprevisibilidad del comportamiento del viento para realizar un despacho de generación a más de 72hs en el futuro. Por lo que el pronóstico meteorológico de vientos, es de las áreas a desarrollar e innovar en el futuro cercano, para hacer realidad la instalación de parques eólicos en gran escala en el mundo y así contribuir muy activamente en reducir la emisión de gases de efecto invernadero en la generación de electricidad en el planeta.

Referencias

- [1] Tangler, J.L.; "The Evolution of Rotor and Blade Design"; NREL/CP-500-28410; National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA, July 2000.
- [2] Hillmer B., Borstelmann T., Schaffarczyk P A, and dannenberg L; "Aerodynamic and Structural Design of MultiMW Wind Turbina Blades beyond 5MW"; *Journal of Physics: Conference Series* 75 (2007); IOP Publishing.
- [3] Reinhard Harte, Gideon P, and .A.G. Van Zijlb; "Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action"; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95 (2007) 1079–1096, Ed. Elsevier.
- [4] Veljkovic,M. and Husson,W.; "High-strength wind turbine steel towers"; Elforsk rapport: 09:11; Stockholm januari 2009.
- [5] Harte,R. and Van Zijl,G.; "Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action"; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95 (2007) 1079–1096, Ed. Elsevier.
- [6] Kumar,R.A., Sohn,C.H., and Gowda,B.; "Passive Control of Vortex-Induced Vibrations: An Overview"; *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2008, Vol. 1, No.1, pp1-11; Bentham Science Publishers Ltd.
- [7] Malcom,D.J.; "WindPACT Rotor Design Study: Hybrid Tower Design"; National Renewable Energy Laboratory , Golden, Colorado, NREL/SR-500-35546, April 2004.
- [8] <http://www.windtowersystems.com/> ; fecha: 12/05/2011.
- [9] *OptiSpeed®; "Manual de Mantenimiento Vestas V90-1.8 MW", Stocolmo, 2009.*
- [10] Fischer,M.; "A Giant of a Generator Superconducting Seatitan Shows a New Path to 10 MW"; *Renewable Energy World*; September 2010, pp7-11.
- [11] Holm,C., and Weis, J.J.; "The structure of ferrofluids: a status report"; *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Vol. 10, pp. 133-140, 2005.
- [12] Hong,R.Y., Zhang,S.Z., Han,Y.P., Li,H.Z., Ding,J. and Zheng,Y.; "Preparation, characterization and application of bilayer surfactant-stabilized ferrofluids"; *Powder Technology*, Vol. 170, pp 1–11, 2006.
- [13] Melle,S., Rubio, M. A., and Fuller, G. G.; "Time Scaling in Aggregation of Magnetic Dipolar Particles: Scattering Dichroism Results"; *Physical Review Letters*, Vol. 87 - Number 11, 2005.
- [14] Domínguez-García,P., Melle,S., Calderón,O.G., and Rubio,M.A.; "Doublet Dynamics of Magnetizable Particles under Frequency Modulated Rotating Fields"; *Colloids and Surfaces A*, 2005.
- [15] Olabi,A.G., and Grunwald,A.; "Design and application of magneto-rheological fluid"; *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 2658–2664, 2007.
- [16] Carlos Rinaldi, Arlex Chaves, Shihab Elborai, Xiaowei (Tony) He, Markus Zahn; "Magnetic fluid rheology and flows"; *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Vol. 10, pp. 141-157, 2005.
- [17] Elias, F., Bacri,J.C., Flament,C., Janiaud,E., Talbot,D.,Drenckhan,W., Hutzler,S. and Weaire,D.; "Magnetic soap films and magnetic soap foams"; *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 263, pp. 65–75, 2005.
- [18] Mesquida,C.D., Lässig,J.L., "Diseño y caracterización de un fluido MR aplicado a frenos de aeronaves"; II Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica, 2010, Córdoba, Argentina.
- [19] Torres Martínez, M.; Solicitud de Patente. Oficina Española de Patentes y Marcas. 2007.
- [20] Jeppe Johansen and Niels N. Sørensen; "Aerodynamic investigation of Winglets on Wind Turbine Blades using CFD"; Risø-R-1543(EN); Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, February 2006.
- [21] McCullough,G.B. and Gault,D.E.; "Examples of three representative types of airfoil section stall at low speeds", Technical Report, TN 2502 NACA, 1951.
- [22] McAlister,K.W. and Carr,L.W., "Water tunnel visualizations of dynamic stall". *Journal of Fluids Engineering* 101, 367-380, 1979.
- [23] Currier,J.M.and Fung,K.Y., "Analysis of the onset of dynamic stall"; *A.I.A.A., Journal* 30, 2469-2477, 1992.
- [24] Acharya,M. and Metwally,M.H., "Unsteady pressure field and vorticity production over a pitching airfoil", *A.I.A.A. Journal* 30, 403-411, 1992.

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTE

- [25] Shih,C., Lourenco,L.M. and Krothpalli,A. , “Investigation of flow at leading and trailing edges of pitching-up airfoil” *A.I.A.A. Journal* 33, 1369-1376, 1995.
- [26] Shih,C., Lourenco,L.M., Van Dommelen,L.L. and Krothpalli,A., “Unsteady flow past an airfoil pitching at constant rate”, *A.I.A.A. Journal* 30, 1353 – 1161, 1992:.
- [27] Van Dommelen,L.L. and Shen,S.F., “ The spontaneous generation of singulariry in separating boundary layer”, *Journal of Computational Physics* 38, 125-140, 1980.
- [28] Van Dommelen,L.L. and Shen,S.F., “The genesis of separation”, Symposium on Numerical and Physical Aspects of Aerodynamic Flows, Editorial T. Vebeci, págs. 293-311, 1982.
- [29] Cowley,S.; “Computer extension and analytic continuation of Blasius expansion for impulsive flow past a circular cylinder”, *Journal of Fluid Mechanics*, 135, 389-405, 1983.
- [30] Elliott,J.W., Cowley,S.J. and Smith,F.T., “Breakdown of boundary layers on moving surfaces; in semi-laminar flor; in fully unsteady flow”, *Geophysical, Astrophysics and Fluid Dynamics Journal*, 25, 77-138, 1983.
- [31] Peridier, V. J., Smith, C. R. & Walter, J. D. A., 1991: “Vortex-induced boundary layer separation. Part1. The unsteady limit problem” *Journal of Fluid Mechanics*, 232., 91-131.
- [32] Neuhart, D.H., Pendergraft, O.C., “A water tunnel study of Gurney flaps,” NASA TM-4071, 1988.
- [33] Bloy, A.W., Durrant, M.T., “Aerodynamic Characteristics of an aerofoil with Small Trailing Edge Flaps,” *Wind Engineering*, Vol. 19, No.3, 1995, pp 167-172.
- [34] Storms, B.L., Jang, C.S., “Lift Enhancement of an Airfoil Using a Gurney Flap and Vortex Generators,” *Journal of Aircraft* Vol. 31, No. 3, 1994, pp 542-547.
- [35] Giguére, P., Lemay, J., Dumas, G., "Gurney Flap Effects and Scaling for Low-Speed Airfoils," AIAA Paper 95-1881, 13th AIAA Applied Aerodynamics Conference San Diego, 1995.
- [36] Bacchi, F., Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., Colman, J., Martinez, M., Camocardi, M., Boldes, U., “Determinación experimental del efecto de mini flaps Gurney sobre un perfil HQ-17” *Fluidos-2006 IX Reunión Sobre Recientes Avances En Física de Fluidos y sus Aplicaciones*, Mendoza, Argentina, 2006.
- [37] Boldes, U.; Delnero, J.; Marañón Di Leo, J.; Colman, J.; Camocardi, M. & François, D. “Influencia en la sustentación, de los vórtices de la estela de un perfil con miniflap tipo Gurney”. *Actas 1er Congreso Nacional de Ingeniería Aeronáutica*. La Plata. Dic. 2008.
- [38] Cheney, M.C.; “Analysis and Test of Pultruded Blades for Wind Turbine Rotors”, NREL/SR-500-25949, Boulder, Colorado, USA, Julio 1999.