

TENDENCIAS EN EL DISEÑO DE LAS TORRES PARA AEROGENERADORES MULTIMEGAWATT

Anabel Apcarian y Jorge Luis Lässig

*Grupo de Ingeniería del Viento, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue,
Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén Capital, apcarian@gmail.com*

Palabras claves: energía eólica, aerogeneradores, torres, estructuras, multi-MW

Resumen: La tendencia en el mercado eólico es construir turbinas eólicas cada vez más potentes. El incremento de la potencia trae aparejado el aumento del diámetro del rotor, y la necesidad de mayor altura y capacidad portante de la torre.

El aumento de tamaño de la torre incrementa el costo de la misma y la complejidad de su traslado, su montaje y su mantenimiento. Estas limitaciones económicas y tecnológicas constituyen condiciones de borde para las variables involucradas en el diseño estructural.

Las torres híbridas de hormigón y acero parecen funcionar adecuadamente hasta turbinas de 5MW, pero es cuestionable su utilización para turbinas de mayor potencia.

En este trabajo se describen los tipos de torres eólicas existentes en el mercado y se analizan las distintas soluciones tecnológicas que están siendo desarrolladas para optimizar el diseño y construcción de torres para aerogeneradores de más de 5MW.

1. INTRODUCCIÓN

La tendencia en el mercado eólico es construir turbinas eólicas cada vez más potentes. Dado que el incremento de la potencia trae aparejado el aumento del diámetro del rotor, esta tendencia conlleva al rediseño de muchos de los componentes mecánicos y estructurales del aerogenerador.

En el caso de las torres, se requiere mayor altura y capacidad portante. El aumento de tamaño de la estructura incrementa los costos de la misma y la complejidad de su traslado, montaje y mantenimiento. Estas limitaciones económicas y tecnológicas constituyen condiciones de borde para las variables involucradas en el diseño estructural.

Inicialmente las torres eólicas fueron reticuladas de acero. Esta tipología sigue utilizándose para aerogeneradores de baja potencia, pero no es viable para turbinas multi-MW. Estas torres fueron reemplazadas por las tubulares de acero, debido a sus ventajas en montaje y en impacto visual. Las desventajas de estas últimas son su vulnerabilidad a la fatiga y la inestabilidad lateral que presentan a partir de los 85m, por lo que tampoco serían recomendables para turbinas multi-MW. Para esos casos se han utilizado torres de hormigón pretensado, pero también presentan inconvenientes debido a cambios en la rigidez del material ocasionados por cargas térmicas y a la dificultad de su traslado. Para longitudes mayores a 100m, empresas fabricantes de torres están desarrollando torres híbridas de hormigón premoldeado y acero.

Otras soluciones tecnológicas para las torres de aerogeneradores multi-MW, se están investigando numérica y experimentalmente. En este trabajo se describen dichas innovaciones y se analizan las opciones que resultarían viables para turbinas eólicas de más de 5 MW.

2. METODOLOGÍA UTILIZADA

Se recopilaron los antecedentes y bibliografía existentes sobre el tema, así como también información sobre las torres existentes en el mercado y sus características. Con los datos obtenidos se estudió la evolución en el diseño de las torres en función del incremento de la potencia de las turbinas eólicas. En base a dichos antecedentes y a las características de los prototipos de nuevos aerogeneradores multimega en funcionamiento, se estimaron los requisitos que deberán cumplir las torres en el futuro. También se estudió la situación de las torres en el país, relevando las tipologías existentes en distintos parques eólicos argentinos.

3. RELACIÓN POTENCIA-ALTURA DE LA TORRE

Mientras que en los '80s se construían aerogeneradores de 50kW de potencia nominal y el desafío era llegar a 1MW, hoy se habla de prototipos de más de 5MW. Un ejemplo es la turbina eólica de 6MW construida en 2011 por la empresa china Sinovel. (Qi, 2011).

El desarrollo de turbinas cada vez más potentes implicó sucesivos incrementos en los tamaños del aerogenerador y el rotor, y por lo tanto en las cargas que debían soportar las torres. Es así que conjuntamente con las innovaciones tecnológicas que permitían extraer mayor potencia de las máquinas, se fueron desarrollando diseños estructurales para torres cada vez más grandes. En los últimos 30 años, los aerogeneradores han cuadruplicado su tamaño.

En la [Figura 1](#) se observa la evolución en el tiempo de la potencia y el diámetro del rotor.

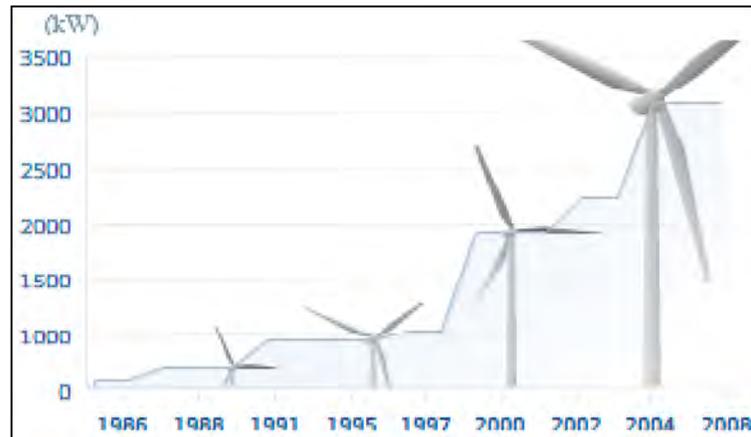


Figura 1: Evolución de la potencia en el tiempo (Vestas, 2012)

4. TIPOS DE TORRES

Además de ser el elemento estructural que transfiere a la fundación las cargas de la góndola y el rotor, la torre es la parte más visible del aerogenerador, con lo cual no debe despreciarse su estética. Por estos motivos es esencial seleccionar la geometría y el material más conveniente a cada caso.

Para ilustrar la distinta respuesta estructural que puede obtenerse variando las condiciones formales y materiales de las torres, en la Figura 2 se presentan los resultados de un estudio realizado en Alemania sobre la turbina experimental WKA-60. Se observa principalmente las que con torres de hormigón se obtienen mayores frecuencias fundamentales.

Turbina Eólica: Rotor: 3 palas Diámetro: 60m Velocidad del rotor: 23 rpm Peso en el extremo superior de la torre: 180t Altura del buje: 50m Altura de la torre: 46,6m	ACERO					HORMIGÓN		
	CILÍNDRICA	CILÍNDRICA CON BASE CÓNICA	CÓNICA	CÓNICA CON RIENDAS	RETICULADA	PREFABRICADA PRETENSADA	REFORZADA	PRETENSADA
Frecuencia del primer modo de flexión [Hz]	0,567	0,577	0,570	0,551	0,60	0,65	0,941	0,947
Múltiplo de la velocidad nominal del rotor [P]	148	151	149	144	157	170	245	247
Diámetro superior [m]	35	35	35	25	35	35	35	35
Diámetro inferior [m]	35	7,1	4,4	25	11,6	35	8,4	5,5
Espesor de la pared [mm]	55 +45 Variable por tramos	25/15 Variable por tramos	30/15 Variable por tramos	20/15 Variable por tramos	16/10	520/250 Variable por tramos	300	300
Peso:								
Torre [t]	150	120	111	40	110	465	485	477
Equipamiento [t]	22	225	22,8	20	225	21	225	225
Total [t]	172	142,5	133,8	60 +riendas	ca. 120	486	507,5	499,5

Figura 2: Comparación de distintos diseños de torres de acero y hormigón para la turbina experimental WKA-60, de potencia nominal 1,2MW (Haus, 2005)

A continuación se describen las tipologías existentes, sus ventajas, desventajas y aplicaciones.

4.1. Torres Reticuladas

Son fabricadas utilizando perfiles de acero soldado. Esta tipología resulta favorable para el tamaño de los rotores de aerogeneradores de baja potencia, por lo que fueron muy utilizadas en la década de los 80 (Spinadel, 2009). A medida que se fueron construyendo rotores de mayores diámetros, cayeron en desuso, dando lugar a las torres tubulares de acero. Uno de los motivos fue el impacto visual de los reticulados, que se intensificaba al crecer las torres en tamaño y se hacía muy notorio cuando se instalaban varias turbinas juntas, como puede apreciarse en la Figura 4.

En cuanto a la factibilidad estructural y tecnológica de las torres reticuladas para aerogeneradores multi-MW, el principal inconveniente técnico radica en la complejidad de su ensamblaje y posterior montaje. Estructuralmente, los nudos son susceptibles a la corrosión y las diagonales son muy sensitivas a las cargas de viento. (Lässig et al, 2011)

Se comercializan para mini-eólica y para instalaciones aisladas, dado que su costo es bastante menor que el de las torres tubulares.

4.2. Torres con riendas

Las riendas se utilizan en aerogeneradores de baja potencia, para rigidizar torres de gran esbeltez, dando como resultado un conjunto estructural liviano y económico. Permiten abatir la torre para bajar el aerogenerador a nivel del suelo, y realizar tareas de mantenimiento. Este tipo de torre es fácil de montar y puede instalarse tanto en terrenos planos como irregulares, aunque es preferible su utilización en zonas llanas. Tienen la desventaja de inutilizar el espacio alrededor del mástil, por lo que su emplazamiento más apropiado es en zonas aisladas no agrícolas. (Escudero Lopez, 2008). La fotografía de la Figura 34 muestra una de estas torres.



Figura 4: Ejemplo de contaminación visual.
Parque eólico Tehachapi, en California, construido en los 80s.
(Buster, 2009)



Figura 3: Torre con riendas
(Wind Turbine Towers)

4.3. Torres tubulares de acero

Están compuestas por tramos prefabricados de acero que cuentan con bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos "in situ". 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. (Lässig et al, 2011)

Las torres se diseñan con diámetro y espesor creciente hacia la base, con el fin de obtener mayor rigidez en la base, más flexibilidad en el tramo superior, y al mismo tiempo ahorrar material. Algunas poseen todos sus tramos tronco-cónicos y otras combinan tramos cilíndricos y cónicos. El hecho de que la sección sea tubular permite el acceso a la góndola desde el interior de la estructura.

Las restricciones para el transporte y las posibilidades estructurales y económicas del acero limitan la altura de estas torres a 80 m, por lo que en general son empleadas para aerogeneradores de potencia hasta 3MW.

La fabricación de estas torres consta de los siguientes procedimientos que se ilustran en la **Figura 5:**

1. Recepción y control de calidad de las planchas de acero: los cilindros que componen la torre de un aerogenerador parten de unas láminas de chapa oxicortada e imprimada.
 2. Curvado: estas láminas son introducidas en una máquina con grandes rodillos que van conformando las virolas.
 3. Soldado: las virolas se sueldan por arco sumergido hasta formar secciones de diferente longitud.
 4. Granallado, pintado y secado: la estructura se introduce en un túnel de pintado y secado. Terminada la torre en chapa, se procede al tratamiento superficial, que consiste en un granallado y un recubrimiento de pintura.
 5. Ensamblaje de elementos auxiliares: una vez que la torre está seca, se procede al montaje de todos los elementos de servicio, tales como plataformas y escaleras.
- (Diseño y Fabricación, 2010)

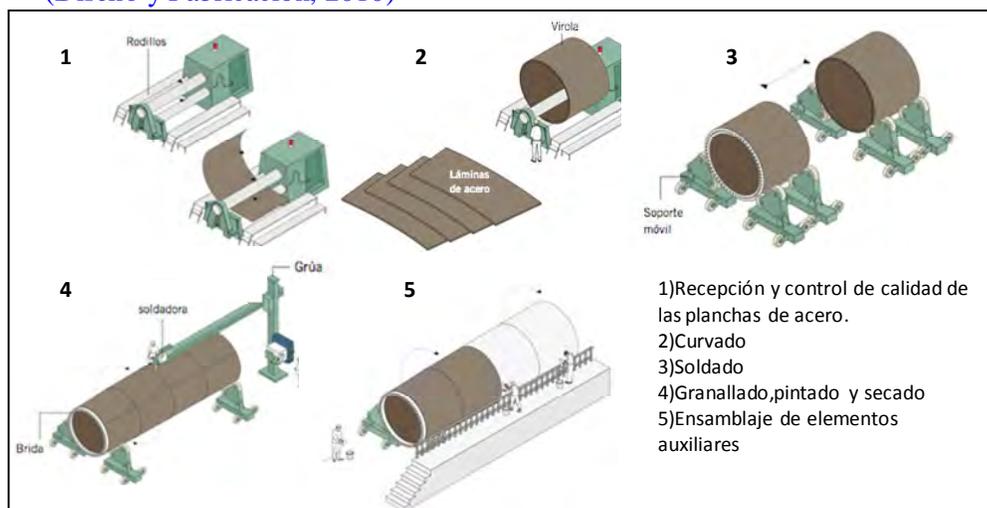


Figura 5: Proceso de fabricación de las torres de acero. (Diseño y Fabricación, 2010)

4.4. Torres de hormigón

Utilizando hormigones pefabricados de alta resistencia permiten alcanzar longitudes mayores a 80m. Sus ventajas son: la libertad de geometría, que da mayor control de su frecuencia natural y respuesta dinámica; la amortiguación del ruido; su gran durabilidad; y el poco mantenimiento necesario. Respecto a torres metálicas equivalentes, al tener mayor peso son más estables, por lo tanto requieren menos inversión en las fundaciones y además reducen

las solicitaciones de fatiga en los equipos, contribuyendo a una mayor vida útil de los mismos. (Torres de Hormigón para Aerogeneradores Multimegavatio, 2009)

Cuando las dimensiones de la estructura imposibilitan el traslado de los segmentos prefabricados, se recurre al hormigonado “in situ”. Al ser éste un procedimiento más artesanal, cuenta con mayores incertidumbres constructivas y tiempos de ejecución. La calidad de la estructura depende de la tecnología de los encofrados y las condiciones meteorológicas influyen más que cuando se utiliza hormigones prefabricados. Generalmente sólo se hormigona “in situ” la parte inferior de la torre, dado que no es una opción económicamente favorable.

La desventaja que puede presentar el hormigón es el debilitamiento y disminución de rigidez debido a variaciones de temperatura. Estas cargas térmicas deben incluirse en el cálculo estructural. (Harte & Van Zijl, 2007)

Si bien las torres de hormigón aún están en etapa experimental y siguen estudiándose sus propiedades resistivas, pueden compararse con las chimeneas industriales de gran altura, que han sido bien estudiadas. Como referencia para el cálculo de altas torres de hormigón podría tenerse en cuenta la norma estadounidense ACI 307-98 (American Concrete Institute, 1998), sobre diseño y construcción de chimeneas de hormigón armado.

En la Figura 6 se muestran dos etapas del montaje de una torre de hormigón prefabricado.



Figura 6: Montaje de torres prefabricadas de hormigón (Torres de Hormigón para Aerogeneradores Multimegavatio, 2009)

4.5. Torres híbridas de hormigón y acero

Los fabricantes de turbinas multi-MW se encuentran a la búsqueda de soluciones estructurales factibles para obtener alturas de buje del orden de los 150m. Por tal motivo varias empresas fabricantes de torres están estudiando distintas opciones de torres híbridas, tipología que al momento parece ser la más favorable para el caso.

Consisten en un tramo inferior de hormigón al que se acopla una estructura metálica. La combinación de materiales logra rigidez en la base de la torre y más flexibilidad en la parte superior. Generalmente se utilizan hormigones premoldeados de alta resistencia y secciones

tubulares de acero. La sección transversal puede ser de distintas formas: cilíndrica, triangular, octogonal o en forma de cruz.

Estas torres permiten alcanzar longitudes mayores a 100m y logran frecuencias naturales que evitan la resonancia con la frecuencia del viento.

La empresa mexicana Postensa, construye torres de sección triangular, mientras que la empresa A.T.S. (Advanced Tower Systems) de los Países Bajos, comercializa un modelo de sección transversal de hormigón en forma de cruz, luego de haber experimentado con otras secciones. Este diseño, además de su eficiencia estructural, facilita el transporte, agiliza el montaje y es visualmente agradable. Para la parte superior de acero, A.T.S. utiliza torres metálicas de fabricación estándar. (De Vries, 2009). En la Figura 7 se muestra el ensamblaje de una de éstas torres.

En Estados Unidos, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) encargó a los consultores BergemABAM el estudio de una serie de torres híbridas y de hormigón prefabricado para la instalación de aerogeneradores de potencia entre 1.5 y 6 MB. El prototipo de torre híbrida desarrollado se muestra en la Figura 8. (BergerABAM, 2011)

Malcom, (2004) estudió otros tipos de torres híbridas, por ejemplo combinando secciones tubulares de acero, con reticulados y tensores de acero.



Figura 8: Ensamblaje de torre híbrida fabricada por la empresa A.T.S. (De Vries, 2009)



Figura 7: Prototipo de torre híbrida estudiado por BergerABAM (BergerABAM, 2011)

5. CARGAS QUE ACTÚAN EN LAS TORRES

La torre debe resistir su propio peso, el peso de la góndola y el rotor, las cargas de viento, cargas sísmicas de acuerdo a su ubicación, y las cargas aerodinámicas provenientes del rotor. El sistema de fuerzas y momentos transmitido por el rotor a la torre, tiene las siguientes componentes, que se ilustran en la Figura 9:

- Fuerza debida a la resistencia en todo el disco
- Fuerza fluctuante debida a una distribución no uniforme de la velocidad del viento en la capa límite atmosférica.

- Fuerza de guiñada: depende de la distribución no uniforme de las velocidades del viento, del desbalanceo del motor, del mecanismo de transmisión y de la desviación de la velocidad del viento.
- Fuerzas verticales: dependen principalmente de la masa del rotor, del mecanismo de transmisión y del desbalanceo del rotor.
- Fuerzas giroscópicas: aparecen cuando se hace girar al rotor, en funcionamiento, alrededor de un eje vertical.
- Momento torsor: depende de la potencia y el área del rotor.
- Momento de cabeceo: puede ser causado por la distribución no uniforme de las velocidades del viento, por las fuerzas giroscópicas o por la fuerza gravitatoria.
- Momento de guiñada: puede desarrollarse por causa de la fricción.

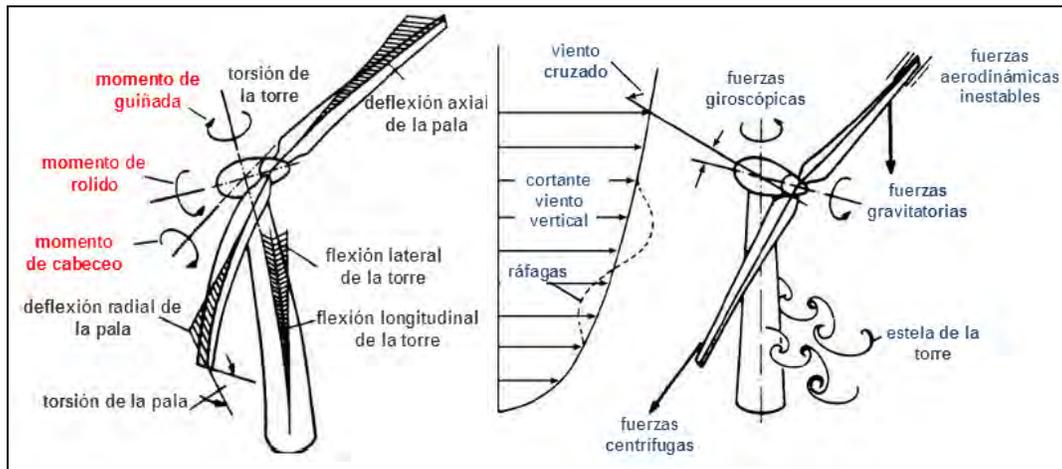


Figura 9: Sistema de fuerzas y momentos transmitidos por el rotor a la torre. (Haus, 2005)

Las cargas deben ser combinadas teniendo en cuenta su probabilidad de ocurrencia simultánea. Para la elaboración de la matriz de combinaciones de cargas, la norma IEC 61-400 (International Electrotechnical Commission, 2005) define:

- *Modo normal de operación + condiciones externas normales.*
- *Modo normal de operación + condiciones externas extremas.*
- *Modo de falla de operación + condiciones externas apropiadas.*

Una vez definidos los estados de carga, se determinan los más desfavorables y se dimensiona la torre para soportar las tensiones y deformaciones ocasionadas por los mismos.

En el dimensionamiento se consideran: la carga de rotura en condiciones extremas, las cargas de fatiga, de pandeo, y los requisitos de rigidez necesarios para soportar las cargas dinámicas a las que estará expuesta durante su vida útil. Esta última es de 20 años.

6. NORMATIVA APLICABLE

El estándar internacional para turbinas eólicas es la norma IEC 61-400:2005. La misma consta de varias partes donde se establecen los requisitos mínimos de diseño, construcción, montaje, verificación y operación de los aerogeneradores y sus componentes. En la Parte 1 (Requerimientos de Diseño), especifica las cargas a tener en cuenta y remite a la norma ISO 2394:1998 (Principios Generales de Confiabilidad para Estructuras) para realizar el análisis estructural. También establece como requisito el cumplimiento de la norma ISO 4354:1997 (Acciones del Viento sobre las Estructuras). Las normas ISO 2394:1998 e ISO 4354:1997 pueden aplicarse en forma conjunta.

Algunos países tienen su propia reglamentación, válida para las condiciones particulares del lugar, por ejemplo la norma danesa DS472 (Cargas y Seguridad para Estructuras de Turbinas Eólicas), o la norma alemana DIBt Richtlinien (Lineamientos para cargas sobre torres y fundaciones de aerogeneradores). Otras normas muy utilizadas en todo el mundo son las de la sociedad alemana de clasificación Germanischer Lloyd, con las que se obtienen valores más conservativos que con las normas IEC. (Schleesselmann, 2006)

En Argentina, no hay un reglamento específico para el cálculo de aerogeneradores, y hasta ahora no existe consenso sobre la normativa a utilizar. Los aerogeneradores importados responden a las normas de sus países de origen.

De acuerdo al Instituto Nacional de Tecnología Industrial (Parmigiani & Aragno, 2012), en el caso de torres reticuladas de acero, podrían aplicarse el reglamento CIRSOC 301: "Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Acero para Edificios" y CIRSOC 306: "Estructuras de Acero para Antenas". Otras tipologías de torres no están contempladas en el cuerpo reglamentario argentino. Para el caso de torres de hormigón podría tomarse como base el CIRSOC 201: "Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado".

7. LAS TORRES DE LOS PARQUES EÓLICOS ARGENTINOS

En 2010 la empresa estatal ENARSA y el Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, ejecutaron el "Programa de Generación Eléctrica a partir de Energías Renovables" (GENREN). Mediante el mismo se licitaron proyectos de energías alternativas por un total de 895 MW, de los cuales 754 MW fueron adjudicados a la eólica. El programa impulsó el desarrollo industrial de estructuras y maquinarias asociadas a esta fuente de energía.

En el país hay algunos fabricantes de torres de acero, como I.M.P.S.A. Wind y N.R.G. Patagonia. Esta industria es reciente y el rubro está muy diversificado. Es usual que una empresa proveedora de torres deba subcontratar a varias más pequeñas para completar el proceso de fabricación de las mismas. Para el cálculo de la estructura, algunos fabricantes contratan estudios de ingeniería europeos o norteamericanos, lo que podría indicar falta de comunicación entre los ámbitos académico e industrial del país. Esto no sucede en todos los casos, ya que otras empresas están desarrollando métodos para el cálculo de las torres, sujetas a los estados de carga que pueden presentarse en los lugares de emplazamiento de los parques (Alberro, 2010).

En los parques eólicos argentinos la potencia de los aerogeneradores no supera los 3 MW. Las torres instaladas son tubulares de acero. En algunos casos están formadas por segmentos cónicos y en otros por cónicos combinados con cilíndricos. Las uniones son abulonadas y las fundaciones de hormigón armado de resistencia H35 y H25.

En los parques anteriores al GENREN, pertenecientes a cooperativas eléctricas locales, las torres fueron importadas junto con las turbinas.

A la fecha no se han detectado fallas estructurales en torres.

En la localidad de El Cuy, provincia de Río Negro, puede observarse un aerogenerador cuya torre colapsó unos meses después de su puesta marcha. Figura 10. El aerogenerador fue instalado por el gobierno provincial en la década del 80 para proveer energía a la localidad. Si bien no se han realizado pericias sobre el mismo, de acuerdo a una entrevista realizada al personal de la empresa proveedora de energía eléctrica, la falla se produjo por errores en el montaje y por falta de mantenimiento. (Avila, 2011)



Figura 10: Torre colapsada en El Cuy, provincia de Río Negro (Saldía, 2011)

8. ACTUALES CAMPOS DE INVESTIGACIÓN

Se está buscando optimizar el diseño de la torre para que puedan soportar aerogeneradores multi-MW. Por tal motivo se experimenta con distintas formas y materiales, se analizan procedimientos constructivos, y se estudian en detalle los patrones de carga a los que se verá expuesta la estructura. A continuación se mencionan los campos de investigación más relevantes.

Materiales: Se estudia la utilización de materiales alternativos al acero debido a las limitaciones que presenta este material, principalmente debido a su gran flexibilidad. El uso de materiales como el hormigón para la producción de turbinas eólicas es uno de los principales retos que plantea la industria eólica.

Una 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. ([Department of Energy of U.S.A., 2008](#))

Estabilidad y resistencia: La estabilidad y resistencia de las torres se estudia con modelizaciones en CFD, ensayos en túnel de viento, y mediciones en escala real.

Para disminuir el riesgo de fatiga en torres tanto de acero como de hormigón, se investigan métodos de control activo o pasivo de vibraciones. Los métodos de control pasivo más comunes son descritos por [Kumar, Sohn y Gowda \(2008\)](#).

Buscando compensar las variaciones provocadas por las ráfagas de viento, la empresa española Ades diseñó un aerogenerador con rotor monopala oscilante, tren de potencia pendular y góndola autotimonante. El aerogenerador produce hasta 2 MW y su diseño permite restituir las cargas fluctuantes de viento, atenuando las sobrecargas estructurales. Este diseño puede observarse en la [Figura 11. \(Energía Eólica: Turbinas Eólicas Pendulares\)](#)

Análisis de cargas: Se busca reducir la incertidumbre en la determinación de cargas que actuarán sobre la torre durante su vida útil, especialmente las de viento, dada la naturaleza aleatoria de la misma. Se han realizado numerosas investigaciones sobre el comportamiento dinámico de las torres ante cargas de viento cruzado y se investiga el patrón de flujo en torres cónicas de gran altura. Se estudia el desprendimiento de vórtices, para calcular su frecuencia y compararla con la frecuencia fundamental de la torre.

Montaje: Empresas europeas están buscando la solución a las dificultades en el montaje de torres para turbinas multi-MW. Se experimenta con el desarrollo de uniones, piezas de acople, anclajes, moldes para construcción de prefabricados y grúas de montajes entre otros.

El consorcio Desarrollos Eólicos Cántabros, propuso la creación de un sistema de construcción de torres de hormigón de más de 80m, consistente en una grúa soportada por la misma torre de hormigón.

En el caso de las torres acero, se investigan nuevos diseños de las uniones para el ensamblaje de los módulos. Un ejemplo es el método de uniones friccionantes, propuesto por [Veljkovic y Husson](#), que duplica la resistencia a la fatiga de las uniones. ([Veljkovic & Husson, 2009](#))



Figura 11: Turbina pendular (Energía Eólica: Turbinas Eólicas Pendulares)

9. CONCLUSIONES

La construcción de las torres de los aerogeneradores va evolucionando a la par del tamaño de rotor. Las torres tubulares de acero han llegado a su límite en los 80m de altura. La tendencia en el diseño para aerogeneradores multi-MW es utilizar estructuras híbridas de acero y hormigón. Esta tipología parece funcionar adecuadamente hasta turbinas de 5MW, pero es cuestionable su utilización para turbinas de mayor potencia, dado que los costos aumentan rápidamente con el tamaño de la torre, al igual que la complejidad en el traslado y que el tiempo y recursos necesarios para su montaje.

Se está buscando optimizar el diseño estructural, para aumentar la resistencia de la torre manteniéndola liviana, sin un aumento excesivo de los costos. El estudio de nuevos materiales, geometrías, procedimientos constructivos, métodos de transporte y montaje es un campo abierto a la investigación.

En los parques eólicos argentinos, los aerogeneradores instalados no superan los 3MW. Para los mismos se ha optado por torres tubulares de acero, algunas son de fabricación nacional y otras importadas. A la fecha no se han registrado fallas estructurales.

La fabricación de torres en el país es una industria incipiente y no reglamentada. No hay una normativa específica para el cálculo de aerogeneradores, con lo cual las empresas fabricantes son libres de aplicar distintos métodos de cálculo y de ensayos de la torre y sus componentes. Dado el impulso de la energía eólica en Argentina, deberá preverse un cuerpo normativo para el cálculo de estructuras de sostén de aerogeneradores.

REFERENCIAS

- About Vestas: History*. (2012). Recuperado el 30 de Enero de 2012, de Vestas: <http://www.vestas.com/en/about-vestas/history.aspx>
- Alberro, J. G. (2010). Experiencia en Argentina en la Ingeniería de Torres para Turbinas Eólicas Multi-MW. *World Congress & Exhibition Engineering 2010*. Buenos Aires, Argentina.
- American Concrete Institute. (1998). ACI 307-98. *Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys*. Estados Unidos.
- Avila, C. (16 de julio de 2011). Causas de falla del Aerogenerador de El Cuy. (A. Apcarian, Entrevistador)
- BergerABAM. (2011). *Hybrid Concrete/Steel Wind Turbine Towers*. Recuperado el 23 de marzo de 2011, de BergerABAM: <http://www.abam.com/sites/default/files/project-pdfs/off-ss-13.pdf>
- Buster, J. (22 de febrero de 2009). *Tehachapi Turbines on while Clevehoga studies*. Recuperado el 10 de abril de 2012, de Realneo: <http://realneo.us/content/tehachapi-turbines-while-clevehoga-studies>
- De Vries, E. (2009). Concrete-Steel Hybrid Tower from ATS. (J. Jones, Ed.) *Renewable Energy World*, 12 (5), 109-11.
- Department of Energy of U.S.A. (2008). Wind Tower Systems. (J. C. Servo, Ed.) *Profiles in Succes* [En línea], Fall 2008, 30-31. Recuperado el 11 de mayo 2011 de http://www.dawnbreaker.com/about/publications/pdfs/Profiles_Fall08.pdf.
- Diseño y Fabricación*. (2010). Recuperado el 24 de junio de 2012, de Gamesa: <http://www.gamesacorp.com/es/productos-servicios/aerogeneradores/disen-y-fabricacion/proceso-fabricacion-montaje.html>

- Energía Eólica: Turbinas Eólicas Pendulares.* (s.f.). Recuperado el 25 de mayo 2012, de A.D.E.S. Aplicaciones de Energías Sustitutivas: <http://www.ad.es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/turbinas-eolicas-pendulares>
- Escudero Lopez, J. (2008). *Manual de Energía Eólica.* Madrid: Mundi-Prensa.
- Harte, R., & Van Zijl, G. (2007). Structural Stability of Concrete Wind Turbines and Solar Chimney Towers Exposed to Dynamic Wind Action. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 1079–1096.
- Haus, E. (2005). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application and Economics.* (2da. Ed.). Munich: Springer.
- International Electrotechnical Commission. (2005). *IEC 61-400: Wind Turbine Generators Systems, Part 1: Design Requirements.* 3ra. Ed.
- Kumar, R., Sohn, C., & Gowda, B. (2008). Passive Control of Vortex-Induced Vibrations: An Overview. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 1, 1-11.
- Lässig, J. L., Colman, J. L., Apcarian, A., Mesquida, C. D., & Labriola, J. (2011). Desarrollos e Innovaciones Tecnológicas, para Turbinas Eólicas de Multi mega watts. *Congreso Internacional sobre Cambio Climatico y Desarrollo Sustentable.* La Plata.
- Malcom, D. (2004). *WindPACT Rotor Design Study: Hybrid Tower Design.* NREL/SR-500-35546, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, Estados Unidos.
- Parmigiani, M. S., & Aragno, A. M. (17 de septiembre de 2012). Reglamentación sobre Aerogeneradores. (A. Apcarian, Entrevistador)
- Qi, W. (21 de Octubre de 2011). *Sinovel installs first 6MW turbine.* (J. Quilter, Editor, & Haymarket) Recuperado el 15 de Abril de 2012, de Wind Power Monthly: <http://www.windpowermonthly.com/news/1099922/Sinovel-installs-first-6MW-turbine>
- Schleessmann, R. (2006). *State of the Art International Certification of Wind Turbines.* Recuperado el 1 de agosto de 2012, de Germanischer Lloyd Industrial Services: http://www.germanlloyd.org/pdf/State-of-the-Art_International_Certification_of_Wind_Turbines_Paper_Schleessmann_WWEC_Delhi_2006.pdf
- Spinadel, E. (2009). *Energía Eólica.* Buenos Aires: Nueva Editorial.
- Torres de Hormigón para Aerogeneradores Multimegavatio. (2009). *Infopower* [En línea] (117), 27-29. Recuperada el 5 de febrero de 2011 de http://www.inneo.es/images/stories/docs/noticias/eolica_3-_articulo_infopower_jun2009.pdf.
- Veljkovic, M., & Husson, W. (2009). High-strength wind turbine steel towers. Elforsk rapport: 09:11, Estocolmo.
- Wind Turbine Towers.* (s.f.). Recuperado el 15/01/2012, de Aeolos Wind Energy: <http://www.windturbinestar.com/wind-turbine-tower.html>