

DESARROLLO DE UNA TORRE MIXTA DE 100 METROS DE ALTURA PARA UN AEROGENERADOR DE 2MW DE POTENCIA

W. Sebastián Rodríguez¹, Jorge Mario Toro F.¹, Ramiro R. Manzanares¹,
¹ Gerencia de Ingeniería de Proyectos y Presupuestos IPyP/ Sector Obras Civiles / IMPSA Wind
Carril Rodriguez Peña 2451 – Godoy Cruz – M5503AHY, Mendoza, Argentina
Tel: +54 261 4131300 Int: 3459; 3369; 1530; 3181
sebastian.rodriguez@impsa.com jorge.toro@impsa.com ramiro.manzanares@impsa.com

Recibido 13/08/13; Aceptado 23/09/13

RESUMEN: La tendencia del mercado eólico mundial es incrementar la potencia de los equipos de generación a través de la captación de mayores y más estables velocidades de viento, mayores diámetros de rotor y consecuentemente torres de mayor altura. El objetivo de este trabajo es presentar los fundamentos de diseño de una variante de construcción mixta de torres de cien metros de altura, la innovación de un sistema de fundación anular y el impacto económico que podría significar la implementación del conjunto. En primer término se describen los criterios de optimización del sistema de fundación y posteriormente el análisis estructural del tramo de torre en hormigón, realizado bajo lineamientos de normativa internacional y con la asistencia del método de elementos finitos. Por último se exponen en contraste los costos estimados de la alternativa propuesta y de una opción existente íntegramente realizada en hormigón.

Palabras Clave: Torre Mixta, Torre Híbrida, Fundación Anular, Optimización Técnico-económica.

INTRODUCCION

Actualmente los sistemas constructivos más utilizados en torres de gran altura utilizan integralmente el hormigón pretensado o el acero. Si bien las torres de hormigón podrían ser más económicas que las de acero, existe una mayor dificultad desde el punto de vista constructivo. En contrapartida, los costos de torres metálicas se incrementan notablemente para alturas mayores a 85m.

La necesidad de alcanzar mayores alturas para lograr la captación de recurso eólico de mayor calidad amerita el estudio de nuevas alternativas que aprovechen las ventajas de cada uno de los componentes, para obtener variantes que optimicen costos y procesos constructivos.

En el presente trabajo se estudia una torre mixta de 100m de altura para un aerogenerador de 2.0MW, donde se combinan 15m de hormigón y 85m de acero. Se optimiza el sistema de fundación y se realiza una comparación técnico-económica con respecto a un proyecto existente de torre-fundación de hormigón de 100m de altura.

La solución comprende la ingeniería y desarrollo del primer tramo de la torre mixta en hormigón post-tesado realizado in-situ, solidario a una fundación de morfología anular. Sobre el mismo se montan los sucesivos tramos de acero hasta alcanzar la cota final.

Para el análisis estructural del sistema torre-fundación se generó un modelo en elementos finitos mediante un software multipropósito, considerando diferentes modelaciones constitutivas para la variedad de materiales que interactúan en esta clase de sistemas.

Como resultados se reflejan el pre-dimensionamiento estructural, el análisis del proceso constructivo y de montaje, y la comparación técnico-económica.

El trabajo de investigación y desarrollo se enfoca en optimizar aspectos técnicos del sistema de fundación del aerogenerador de 2MW, con el objetivo de impactar positivamente en la economía y practicidad de ejecución y montaje del conjunto.

Dicha optimización parte de una fundación existente, con características geométricas definidas y abarca tres lineamientos de diseño que desembocan en un aprovechamiento máximo de materiales y un incremento en la altura de captación del recurso eólico, lográndose en consecuencia una mayor rentabilidad del sistema: igual capacidad de producción de energía con menor utilización de recursos.

PREMISAS DE DISEÑO

El principal componente desestabilizante en la estructura de un aerogenerador es el efecto de vuelco producido por la acción dinámica del viento sobre la misma. Como es de suponerse, el peso propio del conjunto es un componente esencial para contrarrestar tal efecto adverso. Al aumentar la carga normal "N" se reduce consecuentemente la excentricidad de carga y con ello el efecto de vuelco de la estructura.

Por lo tanto, el peso propio del sistema Torre-Fundación cumple un papel fundamental en la estabilidad global del sistema. En la Figura 1 se observan las "acciones equivalentes" simplificadas sobre el bloque de fundación.

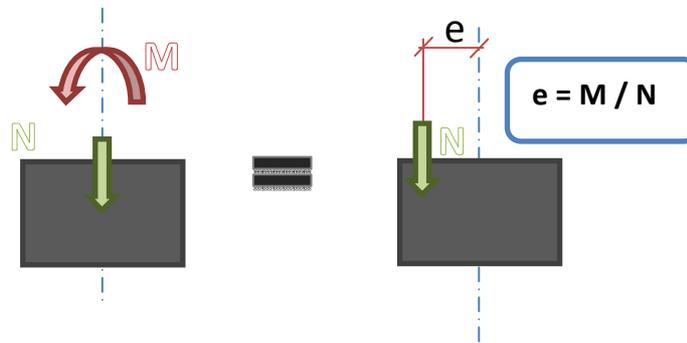


Figura 1 – Acciones equivalentes.

De lo anterior se desprende el primer concepto en la optimización del sistema de fundación: El peso del nuevo sistema de fundación anular más su tramo de torre en hormigón debe ser similar al peso del anterior sistema compuesto únicamente por el bloque de fundación macizo.

Aprovechamiento del volumen de hormigón: Para mantener el peso del sistema se optimiza el volumen de fundación, utilizando la masa excedente para conformar el primer tramo de la torre en hormigón. De esta manera se logra compensar el peso perdido y se sustituye el primer tramo de torre de acero, de elevado costo por los espesores poco convencionales de chapa necesarios y por los sistemas de rigidización en la zona debilitada de puerta de acceso.

Con este concepto se mejora la geometría de la fundación, identificando los sectores de dicha estructura que trabajan de manera ineficiente. Como puede observarse en la Figura 2, existen dos regiones prescindibles desde el punto de vista del aprovechamiento de las características mecánicas del hormigón, el cual sabemos que posee un comportamiento óptimo ante sollicitaciones de compresión:

- En primer lugar puede percibirse que la zona perimetral de la fundación se verá sometida a flexiones motivadas por su forma de viga en voladizo.
- En segundo término, la región central del sistema de fundación masiva se encontrará pobremente solicitada, teniendo en cuenta que la descarga anular de la torre se transmitirá hacia el suelo a través de un bloque triangular teórico de punzonado.

Ambas zonas nombradas resultan más aprovechables en el propósito de formar parte de la torre.

Geometría de la fundación y tensiones admisibles del terreno: La optimización de los volúmenes de hormigón que conforman la fundación reduce la geometría de contacto con el terreno al cual se transfieren las cargas. Como consecuencia de ello es de esperar un aumento en las tensiones de trabajo del suelo de fundación.

Desde este punto de vista entran en juego dos parámetros geométricos que participan en la transferencia de tensiones de contacto al terreno: el área de apoyo "A (m²)" y su módulo resistente "W (m³)". Esto se deduce de la siguiente ecuación (1):

$$\sigma_{\text{adm terreno}} \geq \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_{\text{adm terreno}}$: Tensión admisible del terreno

N: Carga normal a transferir

M: Momento flector resultante sobre la fundación

Teniendo presente que en fundaciones para aerogeneradores el segundo término (M/W) de la ecuación precedente es preponderante por sobre el primero, se deduce que la reducción de área no es un factor crítico, como sí lo es el módulo resistente. Por ello, el problema se reduce a un equilibrio geométrico para sostener los valores de módulo resistente reduciendo las áreas de contacto. Se define que la forma geométrica que cumple perfectamente estas condiciones es una sección anular.

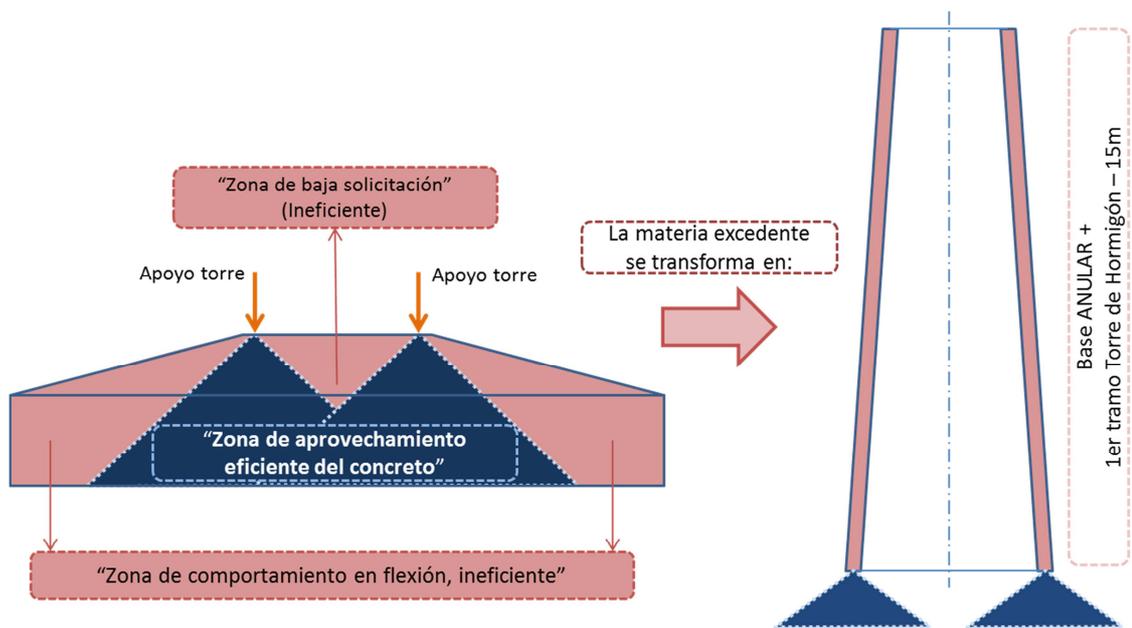


Figura 2. Optimización del sistema de fundación.

Se compara una sección circular de 17m de diámetro con respecto a una sección anular del mismo diámetro externo y 6m de diámetro interno. Puede concluirse que la reducción porcentual de área es de 15%, mientras que la disminución porcentual del módulo resistente alcanza solamente el 1.5%, lo cual se condice completamente con el planteo propuesto.

Geometría del conjunto tramo de torre y fundación adoptada:

A modo gráfico, en la Figura 3, se presenta un esquema del tramo de torre y anillo de fundación en estudio:

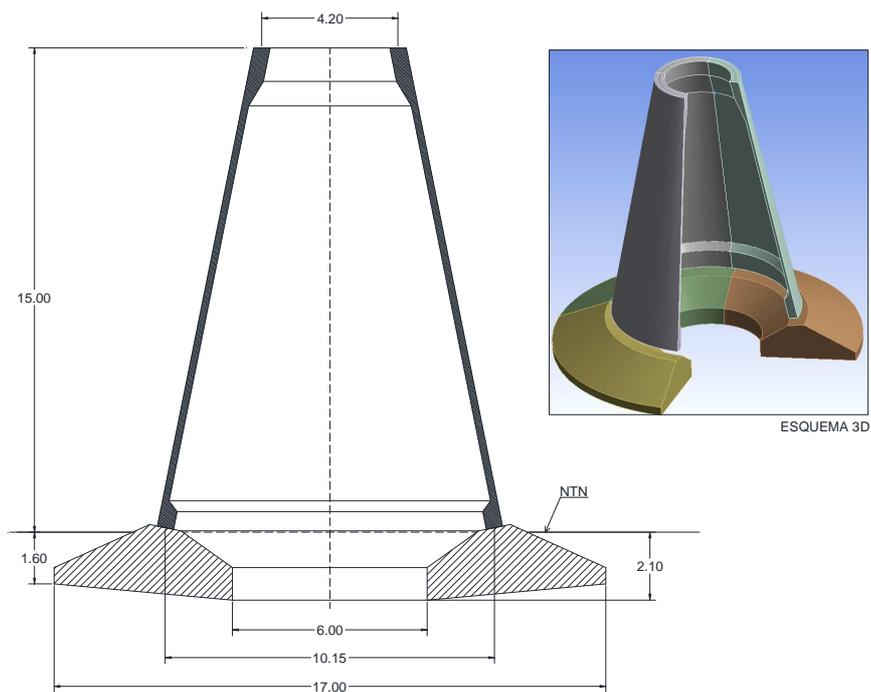


Figura 3. Geometría de fundación y primer tramo de torre.

Consecuencias que se desprenden de la geometría adoptada:

La fundación anular obliga a aumentar el diámetro de unión en la interface torre/fundación, donde se observa lo siguiente:

- El primer tramo de torre de hormigón posee una configuración troncocónica. Su diámetro inferior es de 10.15m, y su diámetro superior queda definido por el diámetro inferior de la torre de acero, que es de 4.20m.
- Esta situación mejora considerablemente la transferencia de cargas hacia la fundación, pues resulta una circunferencia de apoyo mayor al doble de la zona de asiento original. Se reducen notoriamente las tensiones de contacto entre torre y fundación, simplificando claramente los medios de unión y su respectiva armadura de refuerzo.
- Otra ventaja de la ampliación del pie de torre viene dada por la mejor ubicación de todos los equipos auxiliares de control y operación que han de alojarse en dicha zona.

Un reto constructivo y de diseño se presenta en el cabezal del tramo de hormigón, donde debe transferirse la descarga de la torre de acero. Se trata de un punto crítico en el cual deben estudiarse con precisión los fenómenos locales que puedan producirse.



Figura 4. Apariencia del Conjunto

DISEÑO Y SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LA TORRE MIXTA

Se propone como procedimiento constructivo un sistema basado en encofrados reutilizables (ver Figura 4), que permite el hormigonado in-situ y que prevé un post-tesado ulterior, evitando los elevados costos de implantación de una fábrica móvil de pretensado.

El pre-dimensionado de la base anular y de la torre se efectuaron siguiendo los lineamientos del capítulo anterior basados en los códigos DNV/Risø. 2002 [1], Eurocode 2 [2], Eurocode 3 [3], GL Wind [4], IEC 61400-1 [5] y en el texto M.W. LaNier, PE. 2005 [6].

Para tener una noción global del comportamiento del conjunto torre-fundación se realizaron modelos lineales y elasto-plásticos en elementos finitos, mediante el software multipropósito Ansys 14.5 [7]. Se procesaron y se discriminaron los casos de carga para evaluación de resistencia última y de fatiga. Las cargas extremas fueron combinadas teniendo en cuenta el máximo y mínimo valor para cada fuerza y momento, todos afectados por sus correspondientes factores parciales de seguridad.

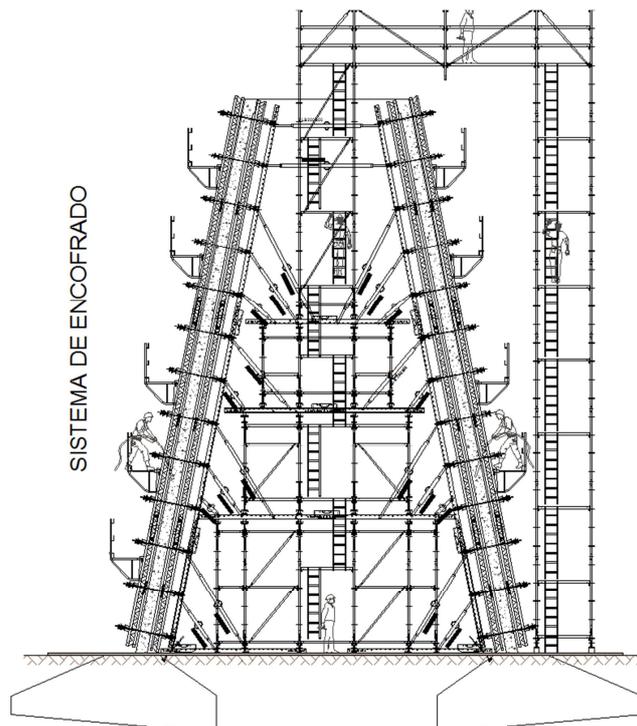


Figura 5. Encofrado propuesto

Se calculó y verificó cada componente del sistema. Se estudiaron:

- 1) tensiones y deformaciones en el suelo, verificando porcentajes de plastificación y despegues máximos;
- 2) situación tensional en la fundación anular, estudio de medios de unión entre torre y fundación, y verificación particular de efectos de torsión que pudieran originarse debido a su morfología;
- 3) tensiones en torre tronco-cónica analizando sistema de post-tesado y estudio particular de puntos críticos, como interfaces de unión y puerta de acceso (ver Figura 5).

Con las tensiones obtenidas se efectuaron el dimensionado de armadura de la fundación y del tabique tronco-cónico de hormigón. Se realizaron diferentes propuestas de espesor de tabiques, optimizándose así la cuantía de acero por metro cúbico de hormigón. Se llegó a una comprobación satisfactoria de dichos valores, sabiendo que el costo del acero es muy representativo y variable en el monto total de cualquier estructura.

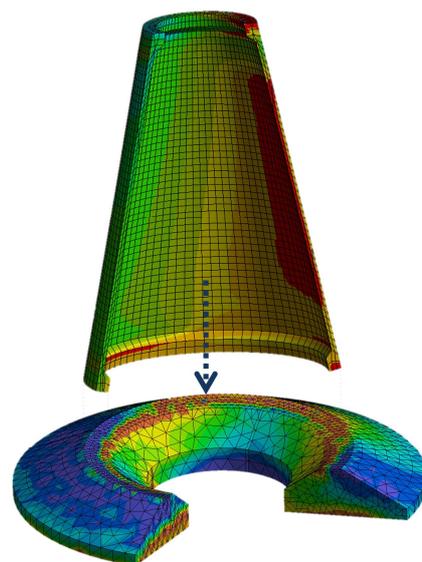


Figura 6. Modelo Elementos Finitos

COMPARACIÓN ECONÓMICA ENTRE LAS SOLUCIONES DE TORRE MIXTA Y TORRE DE HORMIGÓN

Para realizar dicha comparación se buscaron antecedentes técnico-económicos de costos de conjuntos torre-fundación completamente realizados en hormigón. Luego estos valores fueron comparados con los valores obtenidos en el estudio de torre mixta-fundación.

La comparativa puede observarse en la tabla 1, en la cual se desglosan los costos por: Movimiento de suelos para fundaciones, Hormigón para fundaciones y Costos de tramos de torre de hormigón realizados in-situ y de tramos de acero prefabricados.

Item	Designación de tareas	TORRE MIXTA Sub-Totales R\$	TORRE DE HORMIGON Sub-Totales R\$	VARIACION EN BASE A LA TORRE DE HORMIGON %	
1.0	MOVIMIENTO DE SUELOS PARA FUNDACIONES DE LOS AEROGENERADORES	17.105	15.498	10,37%	
	Peso porcentual con respecto al total	0,93%	0,71%		
2.0	HORMIGONADO DE LAS FUNDACIONES PARA AEROGENERADORES	431.292	630.495	-31,59%	
	Peso porcentual con respecto al total	23,50%	28,97%		
3.0	TORRES PARA AEROGENERADORES	1.387.154	1.530.599	-9,37%	
	Peso porcentual con respecto al total	75,57%	70,32%		
TOTALES:		1835550 R\$	2176592 R\$		
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="padding: 5px;"> Economía estimada : 341041 R\$ -15,67% </td> </tr> </table>					Economía estimada : 341041 R\$ -15,67%
Economía estimada : 341041 R\$ -15,67%					

Tabla 1. Comparativa de Costos de Torre Mixta vs. Torre de Hormigón

El análisis anterior se realizó basado en las siguientes consideraciones:

- Se estimó una producción mínima de 50 torres.
- No se tuvieron en cuenta los trabajos ni materiales de puesta a tierra PAT.
- Los tiempos estimados de ambos procesos son similares (45 días).
- El estudio de la torre mixta está basado en un modelo de pre-dimensionamiento, el cual se podrá optimizar en fase de ejecución. El de torre de hormigón está basado sobre un caso existente.

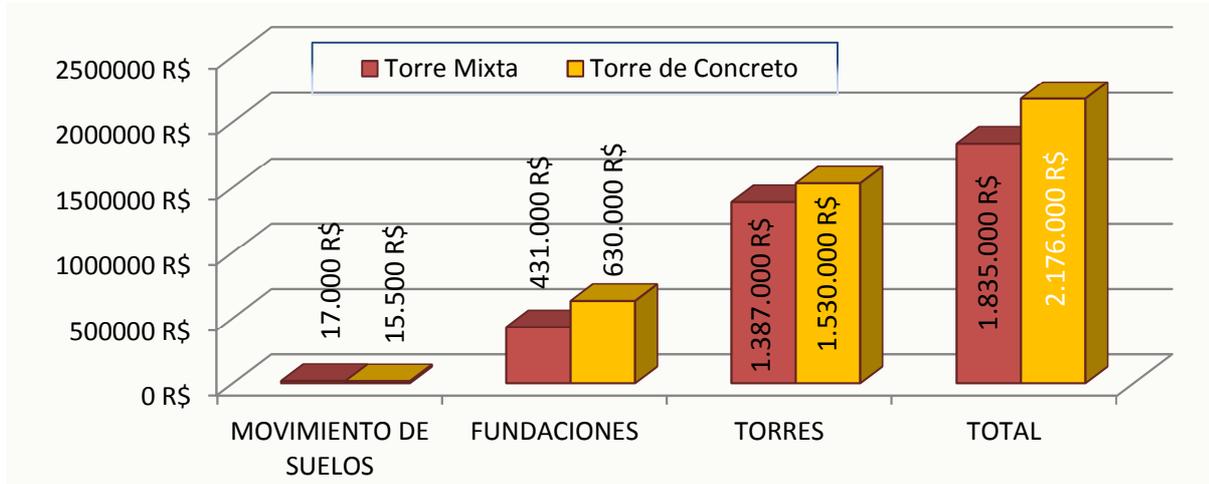


Gráfico 2. Comparativa de Costos de Torre Mixta vs. Torre de Hormigón

CONCLUSIONES

La torre mixta de 15m en hormigón y 85m de acero se presenta como una alternativa a la torre íntegramente construida en hormigón ó acero. Esta solución resulta ser atractiva por su metodología constructiva y económica, comparada con las otras variantes ya mencionadas. Al tratarse de un análisis de pre-dimensionado no deben perderse de vista los desafíos constructivos de algunos puntos singulares, como las interfaces de unión.

Entre las ventajas de la torre mixta se encuentra la facilidad en su construcción. Para el primer tramo de torre se requiere sólo un sistema de encofrado reutilizable realizando un hormigonado continuo. Con este proceso se logra una superficie terminada en menos de 10 días para el posterior montaje tradicional de los tramos metálicos. El montaje del conjunto será realizado en un plazo global menor al de una torre de hormigón. Por otra parte se evita la realización de una planta de prefabricación de alto costo económico.

El sistema de fundación anular tiene la ventaja de requerir una cuantía mínima de armadura, basado en la optimización de la forma de trabajo del hormigón, solicitado mayormente en compresión. Esto conlleva a un fácil montaje de su armadura, reflejándose en el costo de mano de obra.

Por último, la base de la torre mixta cuenta con una superficie interna superior a la base de torres convencionales, permitiendo una mejor distribución de los equipos del aerogenerador.

Desde el punto de vista económico, de acuerdo a la Tabla 1 expuesta en el capítulo anterior, se concluye:

- En el ítem **movimientos de suelos** se observa una ligera desventaja para la variante de torre mixta. Esta variación es del orden del 10%, sin embargo su impacto es despreciable con respecto al costo global del conjunto (1%).
- En el ítem **hormigonado de fundaciones**, que representa aproximadamente entre un 25% y 35% del costo global, se observa la mayor economía para el modelo de torre mixta. En contraste, el costo de la fundación de la torre mixta es inferior en un 31% con respecto al valor de la fundación de la torre de hormigón.
- En el ítem **torres para aerogeneradores** se conserva la tendencia de economía para la solución mixta. En este contexto se observa un ahorro de un 10%, que resulta preponderante en el ítem de mayor impacto del conjunto torre-fundación (75% del costo global).

Finalmente todas las ventajas de este análisis confluyen a una economía global estimada en un 15%.

REFERENCIAS

- [1] DNV/Risø. 2002. *Guidelines for Design of Wind Turbines*. Det Norske Veritas and Risø National Laboratory, Copenhagen. 2nd Edition.
- [2] Eurocode 2. 1992. *Design of concrete structures – Part 1-1: General Basis for buildings and civil engineering works*. pr EN 1992-1-1.
- [3] Eurocode 3. 1993. *Design of steel structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings*. DS/ENV1993-1-1.
- [4] GL Wind. 2003. *Guideline for the Certification of Wind Turbines IV – Part 1*. Germanisher Lloyd, WindEnergie, Germany.
- [5] IEC 61400-1. 1999. *International Standard: Wind Turbine Generator Systems – Part 1: Safety requirements*. IEC, Second Edition.
- [6] M.W. LaNier, PE. 2005. LWST Phase I Project Conceptual Design Study: Evaluation of Design and Construction Approaches for Economical Hybrid Steel/Concrete Wind Turbine Towers. *NREL National Renewable Energy Laboratory*. Colorado, USA, 31 July.
- [7] ANSYS Inc. 2013. *Ansys Workbench 14.5*. Canonsburg, United States.

ABSTRACT

The global wind market trend is to increase the equipment power generation through the uptake of higher and more stable wind speeds, larger rotor diameters and consequently taller towers. The aim of this paper is to present the basics of design of a mixed tower variant of hundred meters high, the innovation of a ring foundation system and the economic impact that the implementation of the whole set could mean. First are described the optimization criteria of the foundation system and subsequently the structural analysis of the concrete tower part, performed under the guidelines of international standards and with the assistance of finite element method. Finally it is presented the estimated costs of the proposed alternative in contrast with an existing entirely concrete made option.

Keywords: Mixed tower, Hybrid tower, Ring foundation, Technical-economical optimization.