**SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CONSTRUCCIONES**

**Evaluación geotécnica y estructural de la cimentación de aerogeneradores del parque eólico La Herradura 1**

***Evaluation geotechnical and structural of the wind turbine foundations of the wind farm La Herradura 1***

**MSc. Yusleydis Cano Ricardo1, Dr.C. Nereyda Pupo Sintras2, Dr.C Noel Iraola Valdés3, Ing. Lilibel Caballol Campos3**

1- Yusleydis Cano Ricardo. Universidad de Camagüey, Cuba. E-mail: yusleydis.cano@reduc.edu.cu

2- Nereyda Pupo Sintras. Universidad de Camagüey, Cuba. E-mail: nereyda.pupo@reduc.edu.cu

3- Noel Iraola Valdés. Universidad de Camagüey, Cuba. E-mail: noel.iraola@reduc.edu.cu

4- Lilibel Caballol Campos. Universidad de Camagüey, Cuba. E-mail: lilibel.caballol@reduc.edu.cu

**Resumen:** Las tecnologías de los aerogeneradores demandan diferentes soluciones de cimentación provenientes de proyectos foráneos para su ejecución en Cuba. Esto constituye una limitante por responder a normativas internacionales que crean incertidumbre al diferir de los códigos cubanos y pueden ser la causa de que no se garantice que los diseños sean adecuados para su implementación en zonas costeras. Por lo que se realiza en este trabajo la evaluación geotécnica y estructural de la cimentación de aerogeneradores del parque eólico La Herradura 1 utilizándose los criterios de diferentes normativas del área internacional y las cubanas. Se comprueba que existen limitaciones para su uso en la tipología de cimentación circular apoyada sobre roca. Se emplea el software profesional STAADPro para la obtención de las solicitaciones de cálculo. Se constata que la cimentación cumple con los requerimientos al vuelco, al deslizamiento y a la estabilidad de la base con holgura. Lo mismo sucede con los momentos resistentes, que exceden a los actuantes con amplio margen. Se realiza un análisis comparativo de las áreas reales de las armaduras radiales y circunferenciales con los valores mínimos por criterios a flexión y retracción, para verificar qué criterio gobierna en el diseño.

***Abstract:*** *Technologies of the wind turbine condition different solutions of foundation coming from strange projects for their implementation in Cuba. This constitutes a restrictive one to respond to international normative that it generates uncertainty when differing of the cubans codes and they can be the cause that it is not guaranteed that the designs are adapted for their implementation in seashore areas. In this work make the evaluation geotechnical and structural of the wind turbine foundations of the wind farm La Herradura 1 being used the approaches of different international normative and the cubans codes. It is proven that limitations exist for their use in the foundation circular typology supports on rock. It uses the professional software STAADPro for the obtaining of the calculation’s solicitations. It is verified that the foundation fulfills the requirements to the overturn, to the slip and the stability of the base with breadth, it also happens to the resistant moments that exceed to the calculation in wide margin. It is carried out a comparative analysis of the real areas of the radial armors and circumferential with the minimum values for approaches to flexion and retraction, to verify that approach governs in the design.*

**Palabras Clave:** Evaluación; Geotécnica; Estructural; Cimentación; Aerogeneradores.

***Keywords:*** *Evaluation; Geotechnical; Structural; Foundation; Wind Turbine.*

**1. Introducción**

En el mundo actual la subsistencia del hombre depende en gran medida del uso de la energía. Aunque existen diferentes maneras de obtenerla, se aboga por que la empleada sea, además de eficiente, el que menos afecte al medio ambiente. Un claro ejemplo de esto se encuentra en la industria de las energías renovables dentro de las que está la eólica, que consiste en generar este recurso a través de la fuerza del viento.

El hombre comenzó a emplear el viento hace más de 5000 años para impulsar sus barcos a velas y no detuvo la innovación para aprovechar este recurso. Dicho estudio dio lugar al surgimiento de los aerogeneradores como estructuras capaces de convertir la fuerza del viento en energía eléctrica. En general existen dos grandes grupos de aerogeneradores según su lugar de emplazamiento: los *onshore*, instalados en tierra y los offshore, cuya localización es dentro del mar.

En Cuba, existen en la actualidad 20 aerogeneradores de tecnología *onshore,* distribuidos en los cuatro parques eólicos existentes: Turiguanó, Los Canarreos, Gibara 1 y Gibara 2. La potencia instalada en conjunto es de 11,7 MW, con lo que la nación se ubica en el puesto 69 a nivel mundial en el empleo de esta fuente de energía limpia (Galbán, 2018). La meta, sin embargo, es superar este escaño. Actualmente, el gobierno tiene en marcha un plan que contempla la construcción de otros 13 parques en la zona nororiental del país, para incrementar la capacidad eólica de la isla a 656 MW (Sáez, 2018). Uno de los proyectos más ambiciosos, dentro de esta estrategia, es la construcción del parque La Herradura 1, enclavado en la provincia de Las Tunas, no solo por su enorme contribución al Sistema Energético Nacional (SEN) sino también por el alto nivel tecnológico que exige su instalación.

Las turbinas son de 65 m de alto y con un diámetro del rotor de 76,9 m, por lo cual requieren de cimentaciones con amplias dimensiones y una gran cantidad de acero de refuerzo para asegurar su estabilidad durante su vida útil. Estas presentan alrededor de 2,75 m de profundidad con un diámetro de 16 m, necesitándose para cada base 360 m3 de hormigón y 400 kN de acero aproximadamente. (Leiva, 2018)

Los diseños actuales de la base de cimentación para los aerogeneradores del parque eólico La Herradura 1, son definidas por el fabricante, estableciéndose geometría, cargas, dimensiones, material y requisitos técnicos constructivos. Sin embargo, se evidencia que generan incertidumbre al ser elaborados con normativas internacionales que difieren de las cubanas vigentes y pueden ser la causa de que no se garantice que estos diseños sean adecuados para ser implementados en zonas costeras. Este problema motivó la presente investigación para comprobar la eficacia del empleo de estas normas en el diseño comparándose con la vigente cubana, según las condiciones ingeniero-geológicas del sitio, las condiciones de seguridad, entre otros y todo ello conducente a establecer criterios de racionalidad. Lo antes expuesto permite plantear como objetivo de la investigación evaluar la solución de cimentación de aerogeneradores del parque eólico La Herradura 1 desde el punto de vista geotécnico y estructural para comprobar si es apropiada para zonas costeras.

**2. Metodología**

En la revisión bibliográfica realizada se valoran criterios de diseño geotécnico y estructural según diferentes normativas internacionales tales como: *Eurocode* 7 (2007), *Det Norske Veritas* (DNV)(2002), NBE-AE-88: *Acciones en la edificación* (1988), EHE-08 *Instrucción de hormigón estructural* (2010), además del análisis crítico de los enfoques que establecen las normas cubanas vigentes NC1321:2019 (2019) y NC 207:2019 (2019), lo que favorece la revisión de soluciones de cimentaciones en tipologías disímiles.

Del análisis efectuado a las diferentes normativas se tiene que los criterios de diseño y revisión de cimentaciones superficiales difieren en los niveles de seguridad asumidos, en los aspectos geotécnicos de cimientos apoyados en roca y en que existen restricciones para abordar la solución estructural en bases circulares. No obstante, contienen aspectos comunes que favorecen la interpretación y el manejo de la información.

Para realizar la revisión desde el punto de vista geotécnico y estructural de la cimentación actual del aerogenerador tipo GW77/1500 del parque eólico La Herradura 1 es necesario conocer las características de la misma. La estructura de cimentación en estudio es aislada de hormigón armado fundida in situ de forma circular con diámetro de 16 m. El plato con peralto variable entre 0,9 m - 2,2 m y el fuste de forma circular con diámetro de 6,8 m.

Los estudios de suelo realizados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Holguín, determinan que el terreno en toda la zona es básicamente rocoso. La investigación fue realizada con las propiedades físico-mecánicas del suelo brindadas por la ENIA en el informe ingeniero geológico. El hormigón empleado en el cimiento tiene una resistencia a la compresión (f´c) de 30 MPa. El refuerzo es con barras de acero de calidad G-60 y el recubrimiento es de 100 mm en el borde inferior del cimiento y de 80 mm en todos los demás casos. En la tabla 1 se muestran las cargas principales del diseño de la cimentación según la documentación del proyecto.

Tabla 1. Solicitaciones de cálculo por proyecto (Elaboración Propia).

|  |
| --- |
| ***Goldwind* 77/1500 diseño de carga de la cimentación de turbina de viento** |
| **Cargas para el cálculo** |  |  |  |  | **Factor de seguridad** |
| Carga normal | 20975 | 111,2 | 379,9 | 2331,3 | 1,35 |
| Carga extrema  | 29331,9 | 1399,55 | 525,1 | 1692,28 | 1,35 |

Una vez detallados los datos por proyecto y por el estudio ingeniero geológico se pasa a realizar el proceso de revisión de los aspectos geotécnicos que inciden en el diseño de la base. Como se establece en las metodologías revisadas el análisis de la estabilidad al vuelco se emplean las combinaciones de cargas con valores característicos, mientras el deslizamiento de la base y la capacidad portante se analizan con valores de cálculo. Con estos valores de solicitaciones se realiza el chequeo geotécnico siguiéndose los criterios de las normativas seleccionadas.

**3. Resultados y discusión**

Las tablas 2, 3 y 4 resumen los resultados de los diferentes chequeos realizados.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Condición** | ***Eurocode 7*** | **NBE:AE-88** | ***DNV*** | **NC 1321:2019** |
| Excentricidad | normal |  | - |  |  |
| extrema |  |  |  |
| Factor de seguridad | normal | - |  | - |  |
| extrema |  |  |

Tabla 2. Resultados de la revisión al vuelco (Elaboración Propia).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Condición**  | ***Eurocode 7*** | **NBE:AE-88** | ***DNV*** | **NC 1321:2019** |
| normal |  |  |  |  |
| extrema |  |  |  |  |

Tabla 3. Resultados de la revisión al deslizamiento (Elaboración Propia).

Tabla 4. Resultados de la revisión a la capacidad de carga (Elaboración Propia).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Normativa** | ***Eurocode 7*** | **NBE:AE-88** | ***Canadiense Manual*** | **NC 1321:2019** |
| Capacidad de carga |  |  |  |  |

Se observa en el chequeo al vuelco que el método propuesto por el *Eurocode* 7 es el más conservador de todos con una diferencia de 83 %. La que presenta un menor valor admisible de excentricidad es la danesa, en correspondencia a la necesidad de restringir este parámetro por el tipo de estructura (aerogeneradores).

En el caso del chequeo al deslizamiento las diferencias en por ciento varían muy poco, se justifica por el hecho de haber asumido en todos los casos el mismo criterio con respecto al coeficiente de rozamiento en la base del cimiento sobre roca.

En cuanto a la capacidad de carga de la roca la normativa más conservadora es el *Eurocode* 7 debido al método prescriptivo que emplea para su determinación. Seguida por la norma española que igual, no presenta una manera precisa de determinar esta capacidad. La norma cubana presenta el valor menos conservador de capacidad de carga al calcularse a través de un método explícito en cuanto a los criterios que deben tenerse en cuenta para considerar la solución de cimentación sobre roca, lo que marca la diferencia.

Se evidencia que la solución de cimentación propuesta para los aerogeneradores de La Herradura 1 en correspondencia con los resultados geotécnicos que se obtienen cumple con un margen amplio en todos los casos.

Para el chequeo estructural a través de las normativas seleccionadas, que en este caso son la norma española EHE-08 y la cubana NC 207-:2019, se hace necesario conocer la distribución de acero.

La cantidad de acero que se proyectó para la cimentación es de 374,42 kN, de los cuales 177,2 kN son de refuerzo y el resto se coloca por construcción, confinamiento y retracción (*Power China Beijing Engineering Corporation Limited*). En la figura 1 se puede apreciar esta distribución del refuerzo superior e inferior y se observa la colocación de una malla ortogonal en la parte inferior como refuerzo del acero radial y circunferencial.



Figura 1. Planta del refuerzo de la cimentación. a) refuerzo superior b) refuerzo inferior (*Power China Beijing Engineering Corporation Limited*).

Las metodologías plantean que para el análisis estructural de la cimentación es necesario realizar los chequeos a flexión, cortante y punzonamiento. Debido a la distribución de acero, para el chequeo de la armadura circunferencial a flexión, los momentos actuantes tangenciales se determinan según J. Calavera (Calavera Ruiz, 2000). Al ser un proceso complejo de realizar manualmente se modeló la base de cimentación usándose el software STAADPro y así poder obtener estos valores.

A modo de resumen se exponen los resultados referidos a parámetros principales que definen la revisión de la armadura a flexión. En correspondencia con el cimiento circular se detallan las magnitudes en el sentido radial y circunferencial como se indican en la tabla 5. Referir que se calculó con y sin malla de refuerzo para analizar su aporte estructural.

Tabla 5. Momentos resistentes y actuantes en el sentido radial y circunferencial (Elaboración Propia).

|  |
| --- |
| **Armadura a flexión inferior** |
| **Dirección** | **EHE:08** | **NC 207:2019** |
| (kNm/m) | (kNm/m) | (kNm/m) | (kNm/m) |
| Radial | Con malla |  |  |  |  |
| Sin malla |  |  |
| Circunferencial | Con malla |  |  |  |  |
|  | Sin malla |  |  |
| **Armadura a flexión superior** |
| Radial |  |  |  |  |
| Circunferencial |  |  |  |  |

Se comprueban diferencias entre las magnitudes de los momentos resistentes en relación a los momentos actuantes, tanto en el sentido radial como en el circunferencial, siguiéndose el criterio de ambas normativas. Se fundamenta en el hecho de que la capacidad mecánica tanto del acero como del hormigón es notable para la solución en estudio. Los cálculos demuestran que estos valores de momentos resistentes oscilan entre un 8 y un 10 % tanto para un armado como para otro y en dependencia de la normativa empleada, indica que el uso de la malla ortogonal no es necesario estructuralmente pues el armado radial y circunferencial es suficiente para garantizar la resistencia de esta cimentación.

Debido a las holguras existentes entre los momentos resistentes y los actuantes, se decide determinar las áreas mínimas mecánicas para comprobar cuál es el criterio que gobierna en el diseño. Para este chequeo se deben verificar las áreas de acero tanto inferior como superior según lo establecido en las normativas analizadas, aclarándose que se hace una verificación con la norma cubana NC 207:2003 que estaba vigente cuando estuvo en vías de aprobación el proyecto de los aerogeneradores que se analiza.

Al comparar los resultados de la norma española EHE:08 y la cubana NC: 207:2003 con el área real perteneciente a la armadura inferior, se verifica que se cumple con las áreas mínimas establecidas por estas normas por lo que se puede plantear que el cálculo de la armadura se define por el criterio a flexión. No ocurre así cuando se compara estas mismas áreas con las mínimas calculadas por la norma vigente NC: 207: 2019.

De lo anterior, al no justificarse estas armaduras por cálculo se evidencia que otros son los factores que no se han tenido en cuenta en la realización de este trabajo. Tal es el caso del efecto dinámico que acercaría los resultados a lo que ocurre en la estructura de cimentación del aerogenerador durante su funcionamiento a partir de la acción de los vientos extremos con componente dinámica notable debido a la variación de velocidades y la aparición de turbulencias y aceleraciones que generan fueras de inercia.

Los resultados del chequeo al cortante y al punzonamiento difieren de una norma. Uno de los factores que incide es la posición de la sección crítica, mientras más cerca se encuentra del fuste (la cubana) hay un incremento de las tensiones resistentes e incide el incremento del peralto hacia esa posición.

Desde la revisión estructural se puede predecir si la solución de cimentación se adecua a las condiciones de emplazamiento con racionalidad. Para ello se constata que, de las comprobaciones realizadas a las armaduras por proyecto según las normativas analizadas, se cumplen con los criterios a flexión, cortante y punzonamiento.

**4. Conclusiones**

La tecnología de aerogeneradores insertados en Cuba en zonas costeras es proclive a la aparición de diversas tipologías de cimentaciones proyectadas por normativas internacionales por lo que es amplia la información técnica sobre el tema, pero no de fácil acceso. Este trabajo es el primer acercamiento a la racionalidad en el diseño de cimentaciones de aerogeneradores, por lo que es un paso importante en este sentido.

Se constata que existen limitaciones con el empleo de las diferentes normativas para abordar el análisis geotécnico de la cimentación circular apoyada sobre roca en zonas costeras. Se exceptúa el caso de la norma cubana NC 1321:2019 que brinda expresiones que permiten abordar directamente este tipo de solución. Se comprueba que la cimentación es estable a través de los chequeos geotécnicos realizados cumpliéndose con un amplio margen derivado de la magnitud considerable de los momentos estabilizantes, aun cuando los efectos horizontales no son despreciables.

En el caso de la revisión estructural, al no contar en las normativas con métodos para resolver la tipología circular, se complejiza el análisis y se precisa del uso de software profesionales. De las comprobaciones realizadas a la cimentación por proyecto, según las normativas analizadas, se verifica que cumple con los criterios a flexión, cortante y punzonamiento con amplio margen, evidenciándose que se está en presencia de un cimiento casi rígido, con una masa elevada de hormigón y acero. Se evidencia que los momentos resistentes exceden por un amplio margen a los actuantes y esto se fundamenta por el hecho de que las áreas de las armaduras radiales y circunferenciales tienen valores cercanos a los mínimos establecidos por flexión y por retracción.

**5. Referencias bibliográficas**

Calavera Ruiz, J. (2000). *Cálculo de estructuras de cimentación* (Cuarta ed.). Madrid, España: INTEMAC, SA.

Canadian Geotechnical Society. (2006). Canadian Foundation Engineering Manual.

Det Norske Veritas, Copenhagen. (2002). Guidelines for design of wind turbines. *2*. Dinamarca: Det Norske Veritas and Risø National Laboratory.

EHE-08. (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural, 4*. Madrid, España: Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica.

ENIA. (2013). *Estudio Ingeniero-Geológico Parque Eólico 51 MW La Herradura I. Plataforma 19.* Estudio Ingeniero Geológico, Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas. Unidad de Investigaciones para la Construcción Holguín, Holguín.

Galbán, N. (22 de enero de 2018). *ESPECIAL: Mayor parque eólico de Cuba se construye con tecnología china.* Obtenido de http://spanish.xinhuanet.com/2018-01/22/c\_136913500.htm

Leiva, V. (2018). *Proyecto Parque Eólico Herradura-1.51MW.* Memoria descriptiva, INEL Ingeniería.

NBE-AE-88. (1988). *Normativa Española de acciones en la edificación*. España.

NC 1321:2019. (octubre de 2019). *Diseño geotécnico de cimentaciones superficiales, 1*. Cuba.

NC 207: 2019. (abril de 2019). *REQUISITOS GENERALES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN, Segunda*. Cuba. Recuperado el noviembre de 2020, de www.nc.cubaindustria.cu

NC 53-82-01. (2001). *Diseño estructural de cimientaciones superficiales. Método de cálculo y diseño, 1*.

Power China Beijing Engineering Corporation Limited. (s.f.). Instrucción general de Turvina de viento Foundation.

Sáez, D. P. (9 de mayo de 2018). *Las Tunas acogerá los dos parques eólicos más grandes de Cuba*. Recuperado el 25 de abril de 2020, de Cibercuba: http://www.cibercuba.com/noticias/2018-05-09-u43231-s27061-aqui-se-levanta-primer-parque-eolico-tunas

UNE-ENV 1997-1. (Marzo de 1999). Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Madrid, España: AENOR 1999.