



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

SEDE OSCAR LUCERO MOYA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES

TRABAJO DE DIPLOMA

**Revisión estructural del edificio No. 50 del
reparto Hermanos Aguilera para la
ubicación de aerogeneradores**

Rodolfo Antonio Batista Sánchez

HOLGUÍN

2017



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

SEDE OSCAR LUCERO MOYA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES

TRABAJO DE DIPLOMA

**Revisión estructural del edificio No. 50 del
reparto Hermanos Aguilera para la
ubicación de aerogeneradores**

Autor: Rodolfo Antonio Batista Sánchez

Tutora: Ing. Yusleydis Cano Ricardo

MSc. Eddy Fernández Ochoa

HOLGUÍN

2017



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

SEDE OSCAR LUCERO MOYA

“Una importante especie biológica está en riesgo de desaparecer por la rápida y progresiva liquidación de sus condiciones naturales de vida: el hombre. (...) Mañana será demasiado tarde para hacer lo que debimos haber hecho hace mucho tiempo”.

Fidel Castro Ruz

Rio de Janeiro, junio de 1992



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

SEDE OSCAR LUCERO MOYA

AGRADECIMIENTO

- A mi familia por toda la ayuda y el apoyo brindado en todos los años de carrera.
- A mis tutores por su ayuda y conocimientos aportados.
- A todos mis amigos y compañeros de la carrera por todos los momentos compartidos.
- A todos los que de una manera u otra me ayudaron a llegar a ser quien soy hoy.



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

SEDE OSCAR LUCERO MOYA

DEDICATORIA

A mi familia y tutores por la paciencia y la ayuda que me han dado para llegar a este momento.

RESUMEN

La utilización de la energía eólica en entornos urbanos para la generación de energía eléctrica crece vertiginosamente debido a la necesidad de obtener electricidad por vías no contaminantes o limpias, por lo que en la presente investigación se realizó la revisión estructural del edificio número 50 ante una posible colocación de aerogeneradores en la azotea del mismo para la generación de electricidad. Partiendo de las mediciones del viento de la Estación Meteorológica 78 372, se realizó la selección del aerogenerador más idóneo para la colocación en la azotea del edificio teniendo en cuenta factores como la resonancia, el peso, las capacidades de generación y otros. Mediante una distribución de probabilidades de Weibull se pudo calcular los efectos reales del viento de la zona y así la carga dinámica que es aplicada en la estructura. Luego de seleccionar el emplazamiento óptimo en la estructura y el aerogenerador tipo RX-V400-S se obtuvo como resultado que los esfuerzos cortantes y los momentos generados por los 24 aerogeneradores no afectan a la estructura, demostrando que es posible integrar los aerogeneradores con el edificio número 50 en el reparto Hermanos Aguilera para la generación de electricidad en el emplazamiento urbano. La solución del problema de la investigación y el cumplimiento del objetivo fue posible con la implementación de un sistema de métodos de la investigación científica de naturaleza teórica, empírica y estadística – matemática.



SUMMARY

The utilization of the wind energy at urbane environments for the generation of electric power grows vertiginously due to the need to obtain electricity from non-contaminant sources. That's why, it is accomplished in this investigation the structural revision of the building number 50 in front of a possible placement of aerogenerators at the roof for the generation of electricity. From the records of winds velocities of the Weather Station 78372, it was selected of the most suitable aerogenerator for the placement at the building's flat roof taking into account factors like the resonance, the weight, the generating capacities and others. The real effects of the wind of the zone could be calculated by means of Weibull's distribution and the dynamic space charge that is applied in the structure. Right after selecting the optimal emplacement in the structure and the aerogenerator type RX-V400-S it was obtained as a result that the shear efforts and the moments generated by the 24 aerogenerators do not affect to the structure, proving that it is possible to integrate the aerogenerators with the building number 50 in the for the generation of electricity in the urban environments. The solution of the problem of investigation and the fulfillment of the objective was possible with the implementation of a system of methods of the scientific investigation of theoretic nature, empiricist and statistics – mathematics.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE DE LA INTEGRACIÓN DE LOS AEROGENERADORES EN LAS ESTRUCTURAS	8
I.1 Antecedentes del uso de la fuente renovable de energía eólica y su integración en las estructuras.....	8
I.1.1 Experiencias de la integración de los aerogeneradores en las estructuras .	17
I.2 Aspectos técnicos del aerogenerador	19
I.2.1 Análisis de los vientos. Rosa de viento	26
I.2.2 Aspectos a tener en cuenta para la revisión estructural de estructuras ante la integración de aerogeneradores	29
I.2.3 Características de las estructuras ante la integración de aerogeneradores	31
I.3 Softwares empleados en el análisis de estructuras	32
CAPÍTULO II: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO NO. 50 EN EL REPARTO HERMANOS AGUILERA, CIUDAD DE HOLGUÍN.....	36
II.1 Análisis del objeto de estudio.....	36
II.2 Revisión del estado estructural del edificio ante los efectos generados por la integración de los aerogeneradores.....	40
II.2.1 Análisis geométrico.....	40
II.3 Análisis de resultados	50
CONCLUSIONES GENERALES	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS 66	

INTRODUCCIÓN

El consumo mundial de electricidad es un sector cada vez más necesario y a su vez el más costoso. Debido a las múltiples aplicaciones de la electricidad es, en la actualidad, un aspecto primordial en la vida diaria, pero su forma de obtención está afectando cada vez más al medio ambiente.

La mayor parte de la energía primaria que hoy se consume en el planeta proviene de la quema de los combustibles fósiles, como es el caso del petróleo, el carbón mineral y el gas natural, los cuales se emplean en la generación de energía eléctrica. Su consumo se caracteriza por la liberación de enormes cantidades de CO₂ a la atmósfera en el proceso de combustión, gas que interviene de forma directa en el calentamiento global. Otras sustancias que se producen es el dióxido de azufre, de efecto perjudicial que da origen a la formación de lluvias ácidas, que afectan a la biosfera ya que ocasiona daños en los bosques, ríos, lagos y terrenos cultivables.

El mundo tal y como lo conocemos se encuentra en un punto de inflexión en el cual está obligado a encontrar una solución a los problemas de contaminación ambiental, y a la generación de energía eléctrica para su desarrollo. El fin de los combustibles fósiles y la acelerada contaminación atmosférica junto a una mayor toma de conciencia a nivel internacional da paso a la necesidad de obtener energía de manera limpia. Al mismo tiempo los gobiernos de países que no poseen o agotaron sus fuentes de energía tradicionales (como el petróleo o el gas) necesitan adquirir esos recursos de otras economías, y tratan de evitar dicha dependencia energética, así como el efecto negativo que produce en su economía esa adquisición.

Las fuentes renovables constituyen una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica. La navegación a vela, los molinos de viento o de agua y las disposiciones constructivas de los edificios para aprovechar la del sol, son buenos ejemplos de ello. Hacia la década de los años 1970 las fuentes renovables se consideraron una alternativa a las

energías tradicionales, tanto por su disponibilidad presente y futura garantizada (a diferencia de los combustibles fósiles que precisan miles de años para su formación) como por su menor impacto ambiental.

En la última década se ha producido una expansión extraordinaria del aprovechamiento de la energía eólica para la generación de electricidad. La disponibilidad de zonas con potencial eólico estimable junto con las políticas de apoyo a las fuentes renovables de energía, sobre todo la eólica, han contribuido a un enorme desarrollo industrial y tecnológico de este sector. La energía eólica está presente en un total de 79 países; 24 de ellos con más de 1.000 megavatios (MW) instalados. En términos de acumulación de megavatios los cinco principales mercados son China, Estados Unidos de América (EE.UU.), Alemania, España e India.¹

A partir de 1993 se comenzó a implementar el sistema de Leadership in Energy & Environmental Design (LEED)² originalmente en los EE.UU. y con el pasar de los años se comenzaría a implementar en otros países. LEED se compone de un conjunto de normas sobre la utilización de estrategias encaminadas a la sostenibilidad en edificios de todo tipo. Se basa en la incorporación en el proyecto de aspectos relacionados con la eficiencia energética, el uso de fuentes renovables de energía, la mejora de la calidad ambiental interior, la eficiencia del consumo de agua, el desarrollo sostenible de los espacios libres de la parcela y la selección de materiales. Aunque poco se conoce sobre la Certificación LEED en Latinoamérica, poco a poco los beneficios de esta calificación se van expandiendo por la región. México, Argentina y Perú son de los países líderes que han adoptado estas medidas.

De acuerdo con la Asociación Mundial de Energía Eólica, Cuba ocupaba al finalizar el 2007, el lugar 61 en potencia eólica instalada, un resultado de la Revolución Energética con el despegue del empleo del viento para producir electricidad. El primer parque

¹Los países de mayor producción de energía eólica. Consultado el 13 de diciembre del 2016. Disponible en: <http://www.infobae.com/2016/03/13/1796528-los-paises-mayor-produccion-energia-eolica/>

²Leadership in Energy & Environmental Design o Dirección en energía y diseño medioambiental. Es un sistema de certificación de edificios sostenibles.

eólico cubano se construyó para mostrar las potencialidades del viento en el archipiélago y para producir electricidad. El mismo se ubica en la Isla Turiguanó, provincia de Ciego de Ávila, y tiene dos máquinas de 225 kW.

En la actualidad, de acuerdo a la evolución de la sociedad, el objetivo principal del aprovechamiento de los vientos constituye la obtención de energía eléctrica a partir de la energía eólica. “Cuba cree firmemente que el desarrollo y la aplicación de la potencia eólica, así como otras fuentes renovables de energía, son la clave para el futuro, no solo para nosotros, sino para todo el mundo”.³

Sin embargo, en Cuba el sistema de LEED no se ha implementado en las nuevas construcciones. La máxima dirección del país promueve investigaciones que tengan en cuenta nuestras limitaciones, y que contribuyan al ahorro de materiales y energía. Universidades cubanas se plantean líneas de investigación que den soluciones a los problemas de obtención de energía eléctrica y al uso racional del agua. El uso de la biomasa, la energía fotovoltaica y el uso de aerogeneradores en entornos urbanos son unos de los temas más debatidos por los estudiantes.

Todos los sistemas de energía eólica generan una serie de aspectos que hay que tener en cuenta para la selección del aerogenerador y el sistema constructivo que se quiere integrar. El aumento del peso de la estructura, la resonancia producida por el motor, el ruido, y la carga dinámica son semblantes de mucha relevancia para evitar posibles fallos. Otros aspectos como la altura, la separación del edificio de estructuras de similar o mayor altura, y la rosa del viento contribuyen al potencial eólico que se puede producir.

En la actualidad la provincia de Holguín se encuentra en explotación del potencial eólico en la zona costera de Gibara con los dos Parques Eólicos, que representan la mayor instalación de ese tipo existente en Cuba. En el municipio Holguín,

³ Moreno Figueredo, C. (s.f.). Estado actual y desarrollo de la energía eólica en Cuba. Consultado el 13 de diciembre del 2016. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar02/HTML/Articulo01.htm>

especialmente en la localidad de la comunidad Hermanos Aguilera se realizaron investigaciones y estudios de viento que prueban la factibilidad de la implementación de aerogeneradores en entornos urbanos. El edificio No. 50 de esa localidad se encuentra en contacto directo con los vientos, y está construido con el sistema FORSA. Sin embargo hasta la actualidad no se implementa la modalidad de la integración de la energía eólica en los edificios en entornos urbanos, a pesar de que existen las condiciones propicias para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes eólicas.

En la actualidad el sistema FORSA es ampliamente construido debido a sus ventajas en cuanto a tiempo y resistencia lo que lo convierte en un sistema óptimo. En Holguín, se utiliza para la construcción de viviendas y edificios multifamiliares. Este sistema es el que más potencialidades puede presentar para la integración de aerogeneradores en la azotea de los edificios en entornos urbanos.

De este modo las valoraciones teóricas realizadas hasta este momento y los resultados del estudio fáctico permiten manifestar la contradicción entre las potencialidades eólicas en entornos urbanos especialmente en el reparto Hermanos Aguilera, y los efectos aerodinámicos que genera la integración de aerogeneradores en las estructuras, y su desconocimiento de la capacidad soportante.

Siendo así el problema científico: El desconocimiento de la capacidad soportante del edificio No. 50 del reparto Hermanos Aguilera ante los efectos aerodinámicos para la integración de aerogeneradores.

Para dar solución al problema científico expuesto se formula la hipótesis de investigación siguiente: De realizarse la revisión estructural bajo los nuevos efectos de carga del edificio No. 50 del sistema FORSA en el reparto Hermanos Aguilera, se podrá conocer si el mismo resistirá las nuevas solicitaciones.

Por tanto, se define como objetivo general: Revisar estructuralmente el edificio No.50 del sistema FORSA en el reparto Hermanos Aguilera ante la integración de

aerogeneradores para la obtención de energía eléctrica. Para lo cual se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el estado del arte de la integración de aerogeneradores en edificaciones
- Revisar estructuralmente el objeto de estudio

El objeto de estudio de la investigación se define como el edificio No.50 del sistema FORSA en el reparto Hermanos Aguilera, y el campo de investigación el análisis y revisión estructural.

Para constatar el valor de la hipótesis y dar cumplimiento a los objetivos planteados se empleó un sistema de métodos de la investigación científica. Los métodos teóricos que se utilizaron en la investigación son:

- Análisis histórico-lógico: Para realizar un análisis histórico del inmueble seleccionado para la integración de los aerogeneradores y su revisión estructural. Resulta de valor además para el análisis cronológico de los fundamentos teóricos-metodológicos que sustentan la propuesta de la revisión estructural del edificio No. 50 del sistema FORSA en el reparto Hermanos Aguilera.
- Sistémico estructural funcional: Para conformar el aporte de la investigación o sea la elaboración de la revisión estructural con un enfoque sistémico que considere a la estructura, componentes y las relaciones que se dan entre los mismos.
- Modelación: Para la elaboración de modelos que permitan comprender la deformación y los puntos críticos de la estructura así como su alcance y significación como uno de los aporte de la investigación.
- Análisis y síntesis: Para el análisis de la información procedente de la caracterización histórica, teórico-metodológica y empírica del objeto y campo de la investigación.

Los métodos empíricos utilizados son:

- Análisis documental: Para la búsqueda de información relacionada con la caracterización histórica, teórico-metodológica y empírica con respecto a la elaboración de una revisión estructural de una edificación de esta índole.
- Entrevistas: Para la realización del diagnóstico del objeto y campo de la investigación.
- Métodos estadísticos-matemáticos: Para gestionar, recepcionar, procesar, representar e interpretar las informaciones derivadas del diagnóstico del edificio y su revisión estructural. Para el análisis de los vientos y la realización del modelo de la estructura.

El aporte de la investigación radica en la revisión estructural acorde con las especificaciones dadas del proyecto estructural original del edificio No. 50 del sistema FORSA en el reparto Hermanos Aguilera, ante los efectos dinámicos generados por la integración de los aerogeneradores. Todo esto conduce al procedimiento real del mismo así como los datos necesarios para su ejecución, y así garantizar la seguridad operacional y funcional de esta estructura, que permitan obtener un modelo de ejemplo en el cálculo estructural con la implementación de las tecnologías de uso de las fuentes renovables de energía, cuestiones que revelan su novedad científica.

La actualidad de la investigación se evidencia en el caso del edificio No. 50 del sistema FORSA en el reparto Hermanos Aguilera, donde no se ha realizado la revisión estructural acorde con las necesidades de conocer las capacidades soportantes del edificio ante la integración de los aerogeneradores. La cual se revela en el hecho de que la misma responde a dos líneas de investigación que se desarrollan en el Departamento de Construcciones de la Universidad de Holguín, la línea de “Resiliencia físico-espacial de elementos estructurales e hidrotécnicos, recursos naturales y urbanos desde el proceso de formación del profesional y el proceso inversionista”, y la línea de “Fuentes renovables de energía” perteneciente al Centro de Competencias.

La investigación está estructurada por dos capítulos. En el primer capítulo se realiza un estudio del arte que permite conocer las características de los aerogeneradores así

como sus ventajas y desventajas ante la integración de los mismos en estructuras. Además se recogen los aspectos técnicos para el análisis y diseño estructural de las edificaciones ante la integración de aerogeneradores así como las experiencias de la integración. En el segundo capítulo se expone el análisis estructural del edificio No. 50 del sistema FORSA en el reparto Hermanos Aguilera. Se realiza además la revisión del estado estructural del edificio ante los efectos generados por la integración de los aerogeneradores y se realiza el análisis de los resultados obtenidos con la investigación.

CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE DE LA INTEGRACIÓN DE LOS AEROGENERADORES EN LAS ESTRUCTURAS

Introducción al capítulo

En el capítulo se expone los fundamentos históricos, teórico-metodológicos y empíricos del proceso de generación de energía eléctrica a partir de la energía eólica. Además se cuenta con una breve explicación de los aerogeneradores y su relación con las estructuras. Se explican las características generales de los aerogeneradores, sus ventajas y desventajas, así como los efectos dinámicos que estos provocan en estructuras, lo cual permite seleccionar el equipo óptimo para su integración en los edificios en entornos urbanos.

I.1 Antecedentes del uso de la fuente renovable de energía eólica y su integración en las estructuras

La producción de torres eólicas a escala industrial comenzó hace aproximadamente tres décadas y desde entonces su diseño evoluciona notablemente. Frente a estructuras iniciales de altura limitada y potencias instaladas del orden de los 20-50 kW (kilowatt), se llega en nuestros días a la instalación habitual de aerogeneradores de más de 80 metros de altura y con potencias del orden del MW (megawatt). La fuerza del viento se aplica en actividades humanas desde épocas remotas, ya que es la única energía de origen no animal que permite la realización de trabajos mecánicos conjunto a la proveniente del agua, estableciéndose en cada época una relación condicionada por la tecnología disponible.

Los primeros molinos de viento datan del siglo VII, en la antigua Persia. Los molinos, de eje vertical y con seis u ocho velas de tela, se usaban para moler grano o para bombear agua. En Europa se construyeron los primeros molinos en el siglo XII en Francia e Inglaterra, de eje horizontal y se obtenía mayores potencia que con los de ejes verticales descritos.

La obtención de energía eléctrica a partir de la fuente de energía del viento empieza entre 1887 y 1888. La construcción de la primera turbina eólica de funcionamiento

automático para generación de electricidad, por Charles Brush, en EE.UU., es uno de los más importantes avances en la tecnología del aprovechamiento del viento. Sus características marcaron las bases para el diseño de los modernos generadores eólicos. La industria eólica internacional adopta una visión muy positiva del desarrollo del mercado eólico mundial de cara a los próximos años. En la actualidad, generan energía eólica más de 80 países, en su totalidad son países desarrollados pero también, y cada vez más, países en desarrollo. Europa es la región con mayor número de aerogeneradores instalados (Figura I.1). Los países desarrollados con su alto capital financiero y tecnologías de punta llevan la vanguardia en la utilización de la energía eólica (Tabla I.1).

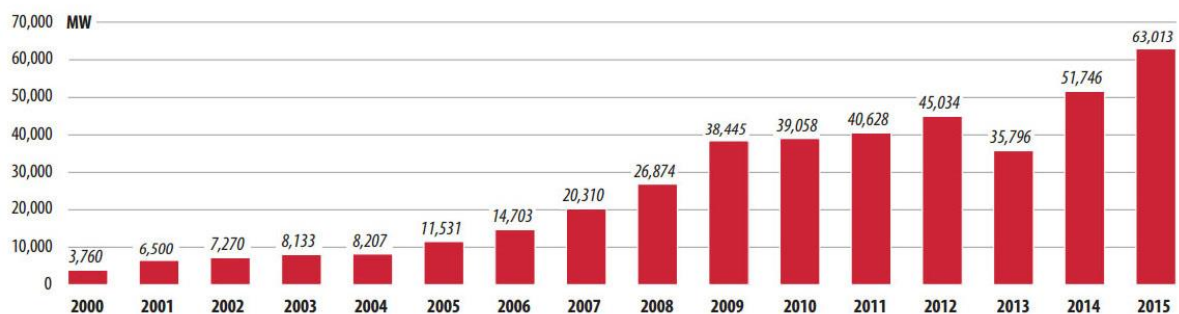


Figura I.1: Potencia eólica anual instalada en el mundo
Fuente: GWEC, 2000-2015

Tabla I.1: Situación por países

Países con mayor capacidad instalada	Cap. Instalada hasta el año 2014 (MW)	Crecimiento en el año 2015 (MW)	Cap. total instalada hasta el 2015 (MW)	Tasa de crecimiento 2015 (%)
China	114 763	32970	148 000	29
E.U.A.	65 754	8 598	74 347	13,1
Alemania	40 468	4 919	45 192	11,7
India	22 465	2 294	24759	10,2
España	22 987	0	22 987	0

Fuente: Half-Year Report, WWEA, 2015

Anualmente la explotación de la fuente renovable de energía eólica aumenta, lo cual es un resultado directo de las políticas en fuentes renovables implementadas por los ejecutivos. Tal acción política, debe acelerarse para que la comunidad internacional pueda alcanzar su objetivo de limitar el aumento del calentamiento global a 2 grados centígrados y dichas políticas necesitan ser apoyadas con una financiación adecuada.

Un análisis reciente del Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC, por sus siglas en inglés) muestra que este año se añadirá una capacidad considerable de empleo de la fuente renovable de energía eólica en Brasil, Canadá, México y EE.UU., mayoritariamente. Actualmente, los principales mercados mundiales son China, EE.UU. y Alemania, los cuales son principales economías a nivel mundial y con sus políticas en energías limpias logran importantes resultados energéticos.

Según los datos del GWEC, en 2014 se instalaron mundialmente 51,5 gigawatt (GW) y se invirtieron 100.000 millones de dólares. Solo China añadió el 45,1% de las nuevas infraestructuras, mientras que Alemania añadió el 10,2% y EE.UU. el 9,4%. La capacidad mundial instalada en 2014 fue de casi 370 GW, de los cuales el 31% fue en China, el 17,8% en EE.UU. y el 10,6% en Alemania.⁴

Según la consultora Mercer en un artículo de junio del 2016 "Invirtiendo en tiempos de cambio climático", se prevé que "el sub-sector de las renovables podría ver aumentar sus rendimientos anuales en una media de entre el 6% y el 54% en un horizonte temporal de 35 años". Otras entidades y empresas destacan las facilidades y beneficios que estas acciones acarrearán sobre el medioambiente y en el desarrollo de las ciudades.

En el mundo cada vez se convierte en un hecho más acentuado la compatibilización de objetos comunes con las fuentes de energía renovable, ejemplo de ello se convierte

⁴Que países son líderes en la implantación de energía eólica a nivel mundial. Consultado el 20 de noviembre del 2016. Disponible en: http://assticperu.com/energia_renovable/que-paises-son-lideres-en-la-implantacion-de-energia-eolica-a-nivel-mundial.html

el alumbrado público, el cual aparte de ser necesario gasta una gran cantidad de energía en mantener amplias zonas iluminadas (Figura I.2). Otras propuestas son un poco más futuristas, en lugares donde se encuentran en desarrollo los autos eléctricos, se cuenta con estaciones de servicio totalmente autónomas donde se pueden recargar los autos sin ocasionar gastos a la red eléctrica gracias a fuentes renovables de energía (Anexo 1, Anexo 2).



Figura I.1: Alumbrado público en Alemania

Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/300w-vertical-axis-wind-turbine-for-home-use-60193937267.html>

El 2015 fue un año importante para las energías limpias. Se dieron las mayores incorporaciones a nivel mundial, se marcaron récords de nuevas instalaciones para la generación eléctrica, y por primera vez el total de inversiones de los países en desarrollo superó al de los industrializados. La fuente de energía eólica domina el crecimiento del sector energético en el mundo y podrá suministrar hasta el 20% de la electricidad global en el 2020, según el último informe del Consejo Mundial de Energía Eólica. La capacidad eólica mundial alcanzó en el 2016 los 456 GW, y se espera que llegue a 500 GW al final del año.⁵

América Latina requiere energía para hacer crecer sus economías. El subcontinente cuenta con condiciones climatológicas y geográficas que lo hacen apto para la

⁵Que países son líderes en la implantación de energía eólica a nivel mundial. Consultado el 20 de noviembre del 2016. Disponible en: http://assticperu.com/energia_renovable/que-paises-son-lideres-en-la-implantacion-de-energia-eolica-a-nivel-mundial.html

generación eléctrica con tecnologías eólicas. Con su relativamente baja densidad de población, grandes distancias y necesidades de energía en lugares remotos, ofrece un entorno ideal para aprovechar la energía del viento. En el 2016, la energía eólica se mantiene como el principal sector de la energía limpia en América Latina y el Caribe, atrayendo 15,500 millones de dólares en inversión, según datos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

La obsesión de América Latina y el Caribe por la generación hidroeléctrica obstaculiza el aprovechamiento de este potencial. A pesar de los costos de construcción, los ambientales y los sociales muchos gobiernos no desisten en asignar grandes presupuestos para obras de este tipo, y en vez de ello, aumentan las inversiones en las fuentes de energía eólica.

Según la generación eólica se va a triplicar de aquí a 2020 y a multiplicar por entre 6 y 10 veces hasta 2035, en dependencia de los escenarios, según el World Energy Outlook 2013. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), de aquí a 2020, año en que están fijados varios objetivos energéticos de muchos países, la energía eólica aumentará al triple de la actual. Además, en el 2035, se habrá multiplicado hasta 10 veces. Estos positivos cálculos dejan a la industria eólica española preocupada, ya que se encuentra en una posición competitiva muy óptima, pero depende de las gestiones del Gobierno.⁶

La AIE asegura que la energía de base renovable representa hasta el 2035 casi el 50% del aumento de la generación eléctrica global. Añade que China será la que produzca el incremento más significativo en la generación eléctrica a partir de renovables, más que la Unión Europea, EE.UU. y Japón juntos.

⁶En 20 años el mercado de la energía eólica mundial se multiplicará por 10. Consultado el 20 de noviembre del 2016. Disponible en: <http://www.energiza.org/eolica/21-eolica/813-en-20-anos-el-mercado-de-la-energia-eolica-mundial-se-multiplicara-por-10>

También afirma que, “en algunos mercados, la creciente proporción de las energías renovables variables en el sector eléctrico suscita profundos interrogantes sobre el diseño del mercado y la aptitud de este para garantizar una inversión adecuada y la fiabilidad del suministro a largo plazo”.

El organismo internacional ve una grave problemática en el diseño del mercado energético y la capacidad de éste para asegurar una inversión adecuada y una confianza total que garantice suministro a largo plazo. Según la AIE, en unos años las energías limpias sobrepasarán al uso de gas natural y prácticamente igualarán al carbón como fuente líder para la generación de electricidad.

En Cuba, el desarrollo de la energía eólica ha estado marcado por la formación y desarrollo de pequeños grupos dedicados a esta actividad. A partir del año 1991 fue llevado a cabo un Programa de Prospección Eólica por especialistas del Grupo Eólico de EcoSol Solar. Como resultado de los estudios fueron identificados sitios ventosos a lo largo de la costa Norte Centro Oriental del archipiélago cubano, lo que demuestra según normas internacionales la posibilidad de utilizar el viento como un recurso natural energéticamente aprovechable a diferentes escalas.

Entre los modelos más difundidos por la geografía del archipiélago están los grandes aerogeneradores horizontales que se encuentran sincronizados en conjunto con la red nacional. Los mismos se ubican en la Isla Turiguanó, Ciego de Ávila con 2 torres, en la Isla de la Juventud en un Parque eólico y en Gibara con dos Parques eólicos que se considera el más grande del país.

La política energética nacional actual se pronuncia por un crecimiento continuo del uso del crudo nacional como fuente principal de combustible en las plantas termoeléctricas, que son responsables de más del 83 % de la generación de electricidad en Cuba. Se espera que el petróleo crudo nacional cubra el 90 % del consumo de combustible dentro de los próximos cinco años, lo que permite al Sistema Energético Nacional (SEN) generar electricidad a un costo menor de 0,04 USD/kWh. Para alcanzar

exitosamente esta meta una intensiva modernización de las plantas termoeléctricas se lleva a cabo, lo que junto con el combustible barato pueden lograr estabilizar el suministro de electricidad a la red nacional.

La industria azucarera se incita a incrementar su participación en el balance energético nacional, para mejorar principalmente su eficiencia en la generación de electricidad y añadir capacidades basadas en el uso del bagazo como combustible principal. Una fuente renovable que suministra actualmente cerca del 10 % de la generación anual de electricidad a escala nacional, pero solamente en los cuatro o cinco meses que duran las zafras.

Existen limitaciones prácticas a los intentos de desarrollar el mercado de parques eólicos conectados a la red eléctrica⁷. Las principales limitaciones para el desarrollo del mercado eólico en Cuba son:

- El bajo costo de la electricidad convencional para el sector industrial.
- Gran disponibilidad de combustibles fósiles.
- En la bibliografía de consulta no se encuentra un programa nacional para el desarrollo de la energía eólica.

Una situación diferente se prevé para las nuevas áreas con desarrollo turístico, principalmente en los cayos de la costa norte, donde varios miles de habitaciones se construirán en los próximos diez o quince años. Debido a su localización geográfica no es prácticamente factible unir estas áreas a la red nacional por lo que se instalan sistemas eléctricos autónomos.

Lo anterior se confirma con la potencialidad del viento en estas regiones donde se alcanzan factores de capacidad mayores de 29 % en las zonas centrales, o de 31 %

⁷Importante desarrollo acelerado de la energía eólica en Cuba. Consultado el 25 de octubre del 2016. Disponible en: <http://www.cubadebate.cu/noticias/2016/09/08/importante-desarrollo-acelerado-de-la-energia-eolica-en-cuba/#.WDSA0PD47MQ>

en las islas de la región centro-este, operando con turbinas eólicas de media y gran capacidad (mayores de 500 kW)⁸.

Las soluciones más convenientes en estos casos son parques eólicos conectados a la red eléctrica local o los sistemas híbridos eólico-diesel. Desde el punto de vista económico y técnico, es necesario hacer un estudio para cada caso, pues las redes locales y las inversiones en cuanto a capacidades de generación tienen actualmente diferentes niveles de desarrollo. El precio de la electricidad que se establece es la clave del éxito junto con una política por parte de los tomadores de decisión que permita conformar una estrategia para el desarrollo de la potencia eólica.

Los aerogeneradores son estructuras con un eje rotacional que en dependencia de la altura y potencia del mismo producirá en conjunto con una carga eléctrica una carga dinámica que se transmite directamente a la base de la estructura. Una carga o acción es dinámica siempre que esta varíe a lo largo del tiempo. Debido a que una carga siempre se puede asimilar a un vector, la variación podrá darse en cualquiera de los tres parámetros que definen al mismo (módulo, dirección y sentido)⁹.

En el presente, el uso de aerogeneradores integrados en edificios está en una fase inicial, y se estudian los efectos que producen sobre las edificaciones. En algunos casos de estudios se comienza a implementar diversos modelos de aerogeneradores en las azoteas, y en dependencia de su potencia la afectación a la estructura será de mayor o menor grado.

En la industria eólica, se usa el concepto de clase de rugosidad o longitud de rugosidad cuando se trata de evaluar las condiciones eólicas de un terreno. Una mayor longitud de rugosidad implica un terreno con más obstáculos al paso del viento. Estas cuestiones tienen enorme trascendencia en el diseño, ya que en muchos casos no es posible situar el anemómetro a la altura del buje de la turbina, disponiéndose de

⁸ Importante desarrollo acelerado de la energía eólica en Cuba. Consultado el 20 de noviembre del 2016. Disponible en: <http://www.cubadebate.cu/noticias/2016/09/08/importante-desarrollo-acelerado-de-la-energia-eolica-en-cuba/#.WDSA0PD47MQ>

⁹ Miguel Tejada, Alejandro (2011). Análisis Dinámico de estructuras en el dominio de la frecuencia.

lecturas de viento a menor altura de 10 metros. En tales ocasiones se necesita extrapolar los datos obtenidos para obtener estimaciones de vientos a la altura de interés, para lo cual se considera las características del terreno (rugosidad) sobre el que se sitúan los aerogeneradores. Por último, en cuanto a las velocidades de viento en una localización determinada, cabe indicar que se analiza el efecto de la turbulencia del viento, el efecto de la estela, el efecto del parque y los efectos túnel y colina, con el objetivo de realizar una estimación adecuada del potencial eólico del emplazamiento.

Razones para elegir turbinas más grandes:

- Existen economías de escala en las turbinas eólicas, donde las máquinas más grandes son capaces de suministrar electricidad a un coste más bajo que las máquinas más pequeñas. Los costes de las cimentaciones, la construcción de carreteras, la conexión a la red eléctrica, además de otros componentes en la turbina como el sistema de control electrónico, son más o menos independientes del tamaño de la máquina.
- Las máquinas más grandes están particularmente bien adaptadas para la energía eólica en el mar, en caso de elegirse esa opción. Los costes de las cimentaciones no crecen en proporción con el tamaño de la máquina, y los de mantenimiento son sensiblemente independientes del tamaño.
- En áreas en las que resulta difícil encontrar emplazamientos para más de una única turbina, una gran turbina con una torre alta utiliza los recursos eólicos existentes de manera más eficiente.

Razones para elegir turbinas más pequeñas:

- La red eléctrica local puede ser demasiado débil para manipular la producción de energía de una gran máquina. Este puede ser el caso de las partes remotas de la red eléctrica, con una baja densidad de población y poco consumo de electricidad en el área.

- Hay menos fluctuación en la electricidad de salida de un parque eólico compuesto de varias máquinas pequeñas, pues las fluctuaciones de viento raras veces ocurren y, por lo tanto, tienden a cancelarse.
- El coste de usar grandes grúas, y de construir carreteras lo suficientemente fuertes para transportar los componentes de la turbina, puede hacer que en algunas áreas las máquinas más pequeñas resulten más económicas.
- Con varias máquinas más pequeñas el riesgo se reparte, en caso de fallo temporal de la máquina por la acción de un rayo.
- Consideraciones estéticas en relación al paisaje pueden en ocasiones imponer el uso de máquinas más pequeñas.

I.1.1 Experiencias de la integración de los aerogeneradores en las estructuras

En el mundo actualmente, se desarrolla cada vez más la integración de estructuras con la integración de las fuentes renovables de energía. De todas ellas la fuente de energía eólica es la que más atractivo tiene en cuanto a la integración con diferentes objetos al ser una de las de menor superficie ocupada.

A nivel mundial, estas integraciones ya dan los primeros pasos en cuanto a su aplicación y desarrollo. Diariamente empresas de distintas naciones compiten en crear y vender el aerogenerador que más se pueda adaptar a edificios o estructuras. Desde luminarias en postes, hasta reducción del consumo de edificios por la integración de aerogeneradores en los mismos se ponen en práctica y se proyectan estructuras más audaces que resistan los efectos de estos equipos.

Mediante la reducción del peso de los componentes, el tamaño y el diámetro los líderes en la producción de aerogeneradores se proponen disminuir el ruido y los efectos dinámicos que producen en las estructuras donde son colocados. Innovaciones como los motores magnetizados, componentes de fibra de carbono, y otros avances garantizan la producción de energía en entornos de baja altura y donde el viento predominante no posee gran fuerza (Figura I.3).



Figura II.3: Edificio Bahrain World Trade Center de 50 plantas con tres aerogeneradores de 29 m de diámetro cada uno

Fuente: <http://www.microsiervos.com/archivo/mundoreal/rascacielos-con-aerogeneradores.html>

Otro de los aportes que se obtienen son las investigaciones de diferentes entidades, las cuales demuestran la factibilidad de utilizar estructuras para la potenciación de la fuerza del viento así como para la colocación de los aerogeneradores. Estudios más actualizados en cuanto al potencial eólico de zonas urbanas y posibles locaciones para la colocación de los mismos son otra de sus resultados.

En Cuba el estudio de las aplicaciones de las fuentes renovables de energía en la construcción se amplía dándole un mayor peso cada año. Entre las líneas de investigación de las universidades la medioambiental es una de las que más se destaca en cuanto a propuestas para el uso de estas fuentes. La Universidad de las Villas, la de Camagüey, la CUJAE, la de Oriente y la de Holguín son de las que más destacan en cuanto a sus propuestas.

El desarrollo del uso de aerogeneradores aún se encuentra en una fase inicial, donde se estudian las locaciones que más potencialidades tiene para la producción de energía eléctrica. Las experiencias que cuenta en la actualidad el gobierno cubano son en cuanto a los grandes aerogeneradores de eje horizontal que se encuentran en explotación en el país (Figura I.4).



Figura I.4: Situación con mayor potencial eólico del país

Fuente: <http://www.microservos.com/archivo/mundoreal/rascacielos-con-aerogeneradores.html>

A pesar de esto las universidades cubanas se plantean líneas de investigaciones que promuevan el estudio de este campo. Se planea ir transitando poco a poco en el camino del uso de las fuentes renovables de energía y con ello el uso sostenible de los recursos.

Holguín cuenta con grupos de investigaciones los cuales abordan estos temas en foros a nivel local e internacional. Investigaciones como las de las compañeras Lizania Pérez González y Lisandra Gutiérrez Alonso, demuestran las potencialidades eólicas que existen en entornos urbanos. A pesar de que aún no se implementan ninguno de estos resultados se continúa el trabajo para lograr la máxima integración de los aerogeneradores en entornos urbanos.

I.2 Aspectos técnicos del aerogenerador

Los aerogeneradores se construyen para atrapar la energía cinética (de movimiento) del viento. Los fabricantes de aerogeneradores deben certificar sus turbinas, y garantizar que una vez cada 50 años puedan soportar vientos extremos de unos 10 minutos de duración. Por lo tanto, para limitar la influencia de los vientos extremos, se opta por construir turbinas con pocas palas, largas y estrechas. Para compensar la estrechez de las palas de cara al viento, los fabricantes prefieren dejar que las turbinas giren relativamente rápido.

Los aerogeneradores en función de cómo esté orientado el generador, y con ello el plano de giro de las palas se pueden distinguir en aerogenerador de eje vertical y aerogenerador de eje horizontal. Estos también se pueden clasificar de acuerdo a su ubicación en tierra firme o en alta mar (offshore).

La primera y más clásica clasificación, se basa en la posición de su eje principal. Los aerogeneradores de eje horizontal, se les llama de esta forma ya que poseen los ejes principales situados paralelamente al suelo. Los elementos de conexión, multiplicador y generador, se encuentran a la altura del rotor en la góndola situado en lo alto de la torre. La disposición de las palas, puede ser a barlovento o a sotavento. Con este tipo de aerogeneradores se obtiene una mayor producción energética, sin embargo, el manipulado, restauración y arreglos que pueda necesitar el generador eólico, provoca que se encarezca su precio.

Dentro de esta clasificación de eje horizontal se puede encontrar otra clasificación, la cual depende del número de palas que tenga el aerogenerador. Se encuentran 3 tipos de aerogenerador en este caso: de dos palas, de tres palas o aerogeneradores multi-palas. Estos aerogeneradores son los convencionales que se pueden encontrar en ciertas regiones de Cuba dibujando un horizonte y paisaje distinto que ofrece energía limpia y barata.

- Aerogenerador de eje horizontal: El rotor se encuentra acoplado a un soporte solidario al generador, están ambos montados sobre una torre que puede ser de metal o de hormigón (Figura I.5).



Figura I.5: Parque eólico de Aerogenerador de eje horizontal en Holguín, Cuba
Fuente: <http://www.energiza.org/eolica/21-eolica/813-en-20-anos-el-mercado-de-la-energia-eolica-mundial-se-multiplicara-por-10>

Sus principales ventajas son:

- Eficiente diseño aerodinámico.
- Ampliamente probado en el mercado.
- Más económico, y el más utilizado para la generación de energía.
- Generan mayor cantidad de energía eléctrica que los aerogeneradores verticales.

Sus desventajas son:

- No se pueden situar cerca unos de otros, debido a que producen el efecto de frenado de aire propio de los aerogeneradores de eje horizontal.
- Necesitan un mecanismo de orientación respecto al viento, pues sus palas son direccionales.
- Producen más ruido que los aerogeneradores de eje vertical.
- Debido a su tamaño y potencia frente a vientos de mayor fuerza se necesita la utilización de maquinaria pesada para su instalación y mantenimiento, debido a que producen una mayor cantidad de resonancia en la estructura.

- Aerogenerador de eje vertical: El generador se localiza en la base de la torre y aunque es más sencillo de mantener, el rendimiento de la instalación es menor que en los aerogeneradores de eje horizontal por lo que prácticamente no se utilizan (Figura I.6).

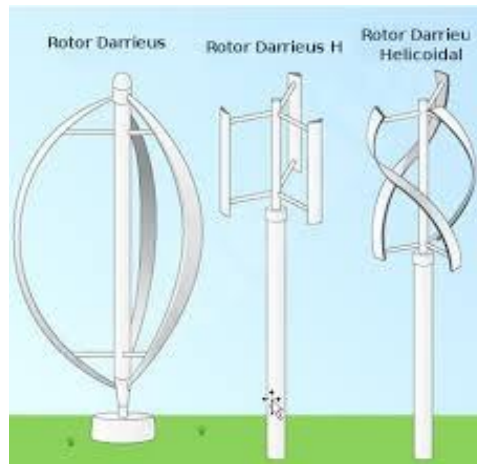


Figura I.6: Modelos de Aerogenerador de eje vertical

Fuente: <http://www.energiza.org/eolica/21-eolica/813-en-20-anos-el-mercado-de-la-energia-eolica-mundial-se-multiplicara-por-10>

Los aerogeneradores de eje vertical son aquellos en los que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo. También se denominan VAWT (del inglés, Vertical Axis Wind Turbine), en contraposición a los de eje horizontal o HAWT (del inglés, Horizontal Axis Wind Turbine).¹⁰

Sus principales ventajas son:

- Se pueden situar más cerca unos de otros, debido a que no producen el efecto de frenado de aire propio de los HAWT, por lo que no ocupan tanta superficie.
- No necesitan un mecanismo de orientación respecto al viento, puesto que sus palas son omnidireccionales.

¹⁰ Aerogenerador de eje horizontal o vertical. Consultado el 18 de noviembre del 2016. Disponible en: <http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com/2012/07/aerogenerador-de-eje-horizontal-o-vertical.html>

- Se pueden colocar más cerca del suelo, debido a que son capaces de funcionar con una menor velocidad del viento, por lo que las tareas de mantenimiento son más sencillas.
- Más silenciosos que los HAWT.
- Más recomendables para instalaciones pequeñas (de menos de 10 kW) debido a la facilidad de instalación, la disminución del ruido y el menor tamaño.

Sus desventajas son:

- Al estar cerca del suelo la velocidad del viento es baja y no se aprovechan las corrientes de aire de mayor altura.
- Baja eficiencia.
- Mayor gasto en materiales por metro cuadrado de superficie ocupada que las turbinas de eje horizontal.
- No son de arranque automático, requieren conexión a la red para poder arrancar utilizando el generador como motor.
- Tienen menor estabilidad y mayores problemas de fiabilidad que los HAWT. Las palas del rotor tienen tendencia a doblarse o romperse con fuertes vientos.

Entre sus características se encuentra la de ser un generador eléctrico, que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica a través de una hélice y en energía eléctrica gracias a un alternador. Sus precedentes directos son los molinos de viento que se emplean para la molienda en la obtención de harina. En este caso, la energía eólica, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

A pesar de sus ventajas cada aerogenerador debe ser previamente estudiado para ver si se adapta a las condiciones del terreno. Cada uno de ellos posee características que de acuerdo a las condiciones socio-naturales pueden ser idóneo para una locación o no (Tabla I.2).

Tabla I.1: Comparación entre aerogeneradores verticales y horizontales

Artículo	HAWT	VAWT
Velocidad del viento de arranque	Alta (por encima de los 3 m/s)	Bajo (1 m/s)
Turbulencia	Reduce la eficiencia	La eficiencia no se ve afectada
Poder Stability	Cambio por la dirección del viento	Sin ningún tipo de efecto del viento
Ruido	Grande (45 decibeles o más)	Bajo ruido (por ser mecánico trifásico)
Altura de la instalación	Alta (necesidad de evitar la turbulencia del terreno)	Baja (no lo afecta la turbulencia)
Ubicación de la instalación	Solo en áreas abiertas	Cualquier lugar
Material general	Plásticos o compuestos	Aleación de aluminio

Fuente: <http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com/2012/07/aerogenerador-de-eje-horizontal-o-vertical.html>

Control de un Aerogenerador

En lo que respecta al control de un aerogenerador existen una serie de variables que se pueden modificar para obtener las mejores prestaciones o el mejor rendimiento de nuestro aerogenerador. Algunas de estas variables son:

- Regulación por frenos aerodinámicos que se activan por la acción de la fuerza centrífuga y que actúan cuando el giro del rotor no es el adecuado por sobrepasar un cierto valor.
- Control electrónico de la potencia, mediante este control se puede variar la velocidad del rotor, controladas por un microprocesador y accionadas por interruptores estáticos, de esta forma se consigue el deslizamiento del generador y con ello la velocidad del rotor.

Para la selección del aerogenerador a utilizar se revisan distintos modelos del mercado tanto de eje horizontal como de eje vertical, donde los últimos sobresalieron en cuanto a las condiciones necesarias para su instalación en entornos urbanos. Entre las marcas más comercializadas se encuentran la Greef, Yingkou Technology, Hopeful, Bofeng, R&X de mayor procedencia china. De todas las marcas la que obtuvo el mayor

nivel de costo-beneficio fue la R&X, la cual brinda un aerogenerador con las siguientes características (Tabla I.3).

Tabla I.2: Características del Aerogenerador RX-V400-S

Velocidad del viento de arranque	1.5 (m/s)
Corte en velocidad	3 (m/s)
Potencia nominal	300 W
Potencia máxima	400 W
Peso	15 (kg)
Temperatura de funcionamiento	-20°C a 40°C
Propuesta de Altura de instalación	3-12 m
Tamaño	Figura I.7

Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/300w-vertical-axis-wind-turbine-for-home-use-60193937267.html>

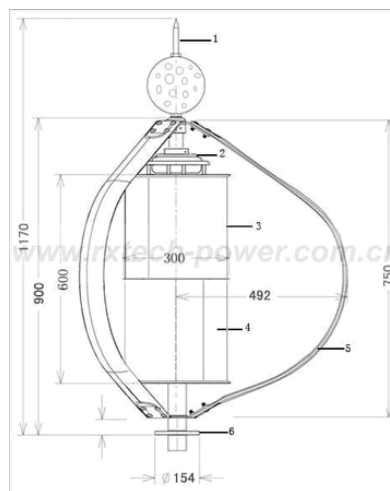


Figura I.7. Aerogenerador RX-V400-S

Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/300w-vertical-axis-wind-turbine-for-home-use-60193937267.html>

Según sus características, su fácil adaptación al terreno urbano, y sus respectivos efectos (Figura I.8), se considera este aerogenerador para los cálculos en la estructura ante su integración.



Figura I.8. Aerogenerador RX-V400-S cercano a una vivienda

Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/300w-vertical-axis-wind-turbine-for-home-use-60193937267.html>

I.2.1 Análisis de los vientos. Rosa de viento

Existen diferentes tipos de rosa de viento en dependencia de los datos utilizados, pero todas con el fin de proporcionar una visión del comportamiento del viento en un emplazamiento determinado. Se pueden encontrar las siguientes:

- Rosa de frecuencias por dirección: Representa la frecuencia sobre el total del tiempo en la que el viento sopla de una determinada dirección. La dirección con una mayor frecuencia (si en general es destacable en comparación con el resto) se denomina dirección predominante.
- Rosa de distribución de velocidades por dirección: Representa la frecuencia de ocurrencia para distintos rangos de velocidad de viento para una misma dirección. Para mostrar estos datos se necesita agrupar las velocidades por rangos de velocidad para poder calcular las frecuencias relativas a cada dirección.
- Rosa de velocidades medias por dirección: Representa la velocidad media por cada dirección, de manera que se necesita agrupar todos los datos de velocidad correspondientes a cada uno de los sectores.

Según los datos de la Tabla I.4 y las características del terreno se selecciona el aerogenerador que cumple con la velocidad de arranque existente en el emplazamiento.

Tabla I.3: Velocidad media y frecuencia del viento por rumbos

Rumbo	Frecuencia %	Velocidad media (km/h)
N	1,88	9,7
NNE	1,06	13,1
NE	4,93	11,1
ENE	13,63	12,4
E	43,8	14,3
ESE	5,48	13,7
SE	1,78	12,3
SSE	0,62	9,7
S	1,78	8,2
SSW	0,38	10,1
SW	0,34	10,6
WSW	0,68	12,1
W	0,65	9,9
WNW	0,45	11,6
NW	0,55	13,4
NNW	0,27	11,3

Fuente: Datos históricos del año 2015 de la Estación Meteorológica 78 372.

Para los cálculos de las variaciones del viento así como la determinación de la curva de potencia, se utilizan distintos tipos de distribuciones las cuales pueden ser:¹¹

1. Distribución de PROBABILIDAD
2. Distribución de BERNOULLI
3. Distribución BINOMIAL
4. Distribución POISSON
5. Distribución NORMAL
6. Distribución GAMMA

¹¹Consultado en Distribución de Weibull el 3 de febrero del 2017 Disponible en: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/probability-distributions-and-random-data/distributions/weibull-distribution/>

7. Distribución T STUDENT

8. Distribución de Weibull

Si se miden las velocidades del viento a lo largo de un año en un determinado emplazamiento se observa que en la mayoría de las áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos moderados son bastante comunes. La variación del viento en un emplazamiento típico se describe con la utilización de la llamada Distribución de Weibull.

La distribución de Weibull es una distribución versátil que se puede utilizar para modelar una amplia gama de aplicaciones en ingeniería, investigación médica, control de calidad, finanzas y climatología. La distribución se utiliza frecuentemente en análisis de fiabilidad para modelar datos de tiempo para falla, como la probabilidad de que una parte falle después de uno, dos o más años. La distribución de Weibull también se utiliza para modelar datos asimétricos del proceso en el análisis de capacidad.

Se describe según los parámetros de forma, escala y valor umbral. El caso en que el parámetro de valor umbral es cero se conoce como la distribución de Weibull de 2 parámetros. La distribución de Weibull se define solo para variables no negativas.¹²

La distribución de las velocidades del viento es sesgada, es decir, no es simétrica. A veces tendrá velocidades de viento muy altas, pero son muy raras mientras que las velocidades del viento de 5,5 m/s son las más comunes. Si se multiplica cada intervalo de la velocidad del viento por la probabilidad de tener esa velocidad particular, y se suman todos, se obtiene la velocidad del viento media.

La importancia de la distribución de Weibull radica en que es la herramienta utilizada para determinar la potencia media del viento en la localización de interés. La potencia

¹²Distribución de Weibull. Consultado el 3 de febrero de 2017. Disponible en: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/probability-distributions-and-random-data/distributions/weibull-distribution/>

del viento es igual a la mitad de la densidad del aire (ρ) multiplicada por el área del rotor (A) y por el cubo de la velocidad del viento (v),

$Pv = \rho * A * v^3$ (Ec.1.1) Fuente. Descripción de las variaciones del viento: distribución de Weibull. Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/viento/datos/estadistica.html>

Si se multiplica la potencia de cada velocidad del viento con la probabilidad de cada velocidad del viento de la gráfica de Weibull, se obtiene la distribución de energía eólica a diferentes velocidades del viento, es decir, la densidad de potencia.

Es importante observar que la mayor parte de la energía eólica se encuentra a velocidades por encima de la velocidad media del viento (promedio) en el emplazamiento. La razón es que las velocidades altas del viento tienen un contenido energético mucho mayor que las velocidades bajas del viento. Como resultado final de todas estas consideraciones se obtiene la Curva de Potencia del aerogenerador, que es un gráfico que indica cuál es la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento.

I.2.2 Aspectos a tener en cuenta para la revisión estructural de estructuras ante la integración de aerogeneradores

Históricamente, la realización de las Normas en Cuba se realiza a partir de normas consultadas, fundamentalmente europeas, que caracterizan su presencia mediante concepciones, enfoques, procedimientos y nomenclatura propios. Todo esto aporta grandes recursos a nuestros diseños pero no se extiende en la práctica del diseño y producción en América Latina donde, en cambio, se emplean principalmente, las elaboradas en Estados Unidos de América.

- Efectos dinámicos sobre la estructura

Una carga es dinámica cuando se aplica una fuerza a una estructura, a menudo acompañada de cambios repentinos de intensidad y posición. Bajo la acción de una carga dinámica, la estructura desarrolla fuerzas inerciales y su deformación máxima no coincide necesariamente con la intensidad máxima de la fuerza aplicada. Las

cargas dinámicas se distinguen de las estáticas por el hecho de originar modificaciones tanto en la magnitud de las tensiones como en las deformaciones a que dan lugar, se afecta también la forma y límite de rotura de los materiales.

Todo sistema, cuando se aparta de su posición de equilibrio realiza oscilaciones alrededor de esta con una serie de modos y periodos de vibración. Si introducimos una perturbación o fuerza que actúe con uno de esos periodos se produce la suma de las amplitudes de las diferentes vibraciones, lo que aumenta progresivamente la amplitud del movimiento y produce finalmente la quiebra del elemento.

Actualmente se proyectan estructuras más audaces (más grandes, livianas, etc.) que son más susceptibles a los efectos dinámicos porque son más flexibles y tienen periodos naturales altos. Las relaciones entre los desplazamientos y los esfuerzos de una estructura son las mismas ya consideradas en el análisis estático, independientemente que la carga sea de tipo estática o dinámica. Para el análisis dinámico es necesario introducir dos tipos de fuerzas que no ocurren en el caso estático:

- Las fuerzas de inercia asociadas a la propiedad de inercia de la masa de la estructura y de las componentes o partes no estructurales.
- Las fuerzas de disipación de energía por diversos tipos de mecanismos de fricción (fricción seca, fricción viscosa, fricción seca en uniones estructurales).

El análisis dinámico apunta a determinar en primer término los desplazamientos de la estructura en función del tiempo, y a partir de ellos determinar los esfuerzos en la forma habitual (barra por barra) propia del método de rigidez tal como se conoce para cargas estáticas.¹³

¹³ Cassano M Arturo, 2009. Análisis de estructuras bajo acciones dinámicas.

I.2.3 Características de las estructuras ante la integración de aerogeneradores

El empleo de estructuras como parte de la integración de las mismas con aerogeneradores reporta ventajas como es la altura ya que al colocarlos en la parte superior del mismo estos se exponen a mayores vientos y por tanto generan mayor cantidad de energía eléctrica (Figura I.9).



Figura I.9: Aerogeneradores de eje horizontal en azoteas

Fuente: <http://www.taringa.net/posts/economia-negocios/11702608/Los-molinos-de-viento-saltan-del-campo-a-las-azoteas.html>

La incorporación de esta tecnología a los edificios responde a la aplicación de las siguientes estrategias de diseño dentro del área de actuación de la energía:

- Minimización de emisiones de CO₂, SO₂, NO₂: Adoptar medidas encaminadas a la disminución de las emisiones a la atmósfera provenientes de la utilización de combustibles fósiles para consumo energético.
- Integración de fuentes renovables de energía: Favorecer la utilización de fuentes de energías renovables (biomasa, solar térmica, solar fotovoltaica, etc.) frente a los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural, etc.)

Los sistemas de generación eléctrica que se basan en las miniturbinas eólicas son ideales para aplicaciones diversas que requieren un suministro de energía independiente de la red eléctrica convencional, o bien que complemente a ésta. Además presenta las siguientes ventajas:

- Inagotable, respetuosa con el medio ambiente, autóctona.
- Proximidad desde el punto de generación al punto de consumo que minimiza las pérdidas de energía.
- Versatilidad de las aplicaciones.
- Accesibilidad para pequeñas economías.
- Desahogo para las redes de distribución sin producir sobrecargas.
- Menor impacto visual que las máquinas grandes.
- No requiere complejos estudios de viabilidad.
- Posibilita instalaciones híbridas.

Este tipo de instalaciones no contaminan, apenas ocupan espacio, requieren un bajo mantenimiento y proporcionan la electricidad que puede suponer una notable mejora en la calidad de vida. Para la posible instalación en estructuras, estas deben cumplir con una serie de requisitos para evitar fallas. Entre las características se pueden encontrar que la cubierta debe tener una alta resistencia y un fácil acceso a ella para la instalación y mantenimiento de los equipos. Otra característica es la resistencia a la carga dinámica que genera estos equipos al entrar en funcionamiento y una correcta transmisión de las mismas a los cimientos. Para un desempeño óptimo la estructura debe ser lo suficientemente alta para alcanzar la máxima velocidad del viento y estar lo más separada de otros obstáculos para evitar grandes turbulencias.

Entre los sistemas constructivos de Cuba uno de los más óptimos es el Sistema FORSA debido a que desde su diseño sismo resistente es uno de los que más capacidades tiene para soportar los esfuerzos dinámicos que los aerogeneradores producen.

I.3 Softwares empleados en el análisis de estructuras

La modelación de estructuras para el análisis en la actualidad se realiza con la ayuda de softwares que permiten modelar de forma más real y calcular las solicitaciones de una manera más rápida. Cada país utiliza el software que más se acondicione a sus

normas, pero entre los más utilizados tenemos a Arquimet, Tekla, Flow 3D, SAP2000, Autocad Robot Structure y Stargrafic. De todos ellos uno de los más famosos y más difundido por sus requerimientos de sistema y la adaptabilidad a diferentes normas es el SAP2000.

SAP2000 es un programa comercial de cálculo de estructuras que se basa en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Se obtiene como resultado de un trabajo desarrollado en los EE.UU. para desarrollar un programa para diseño y análisis de estructuras. El origen de su nombre viene de sus siglas en inglés Structural Analysis Program (Programa de Análisis Estructural), comenzando por su primer nombre SOLIDSAP y continuando con las versiones SAP 3, SAP IV, SAP 80, SAP 90 hasta la más reciente SAP2000 en sus diferentes versiones. El SAP2000 es un programa de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, se puede realizar, de forma totalmente integrada, la modelación, análisis y dimensionamiento del más amplio conjunto de problemas de ingeniería de estructuras.

La potente capacidad de resolución de los métodos numéricos y en concreto el MEF permite el desarrollo de numerosos programas basados en él, para la resolución de todos tipo de problemas (estructurales, mecánicos, térmicos, etc...), siendo SAP2000 el más popular y difundido de ellos. El programa comercial SAP2000 está escrito en ANSI Fortran-77 y desarrollado por Computers & Structures, Inc. en Berkeley, EE.UU..

Operaciones que se pueden realizar con el SAP2000:

- Análisis lineal
- Análisis dinámico por espectros de respuesta
- Cargas móviles
- Análisis en el dominio de la frecuencia
- Elementos de barra (Frame), elementos de área y cáscara (Shell) y sólido
- Dimensionamiento de hormigón, verificación de estructuras metálicas y dimensionamiento de armadura para elementos Shell



- Módulo de pretensado, totalmente integrado, para introducción de los cables de pretensado conectados a todo tipo de elemento y cálculo automático de pérdidas instantáneas
- Posibilidad de considerar los efectos geoméricamente no lineales de PDelta (Es un análisis no lineal que toma en cuenta la deformación inicial de una estructura al someterla a las cargas consideradas. Al sufrir deformaciones, las fuerzas originales actuando sobre la estructura deformada genera excentricidades y por lo tanto momentos y torsiones adicionales) en cargas estáticas y dinámicas
- Generación automática de mallas de elementos finitos, con elementos de 4 nudos

Conclusiones del capítulo

1. La determinación del estado del arte propician una mejor comprensión del uso de la energía eólica para la generación de energía eléctrica, pues se atraviesa un proceso de desarrollo y perfeccionamiento, que incide positivamente en la implementación en las ciudades. Cuya consideración resulta imprescindible para orientar y encaminar este proceso hacia la alternativa de un futuro energético ventajoso y menos contaminante.
2. Las bases fundamentales con sus regularidades establecidas, permiten identificar las concepciones que respaldan el proceso de la energía eólica dentro de los ambientes urbanos. Donde se viabilice la obtención de información de manera que se destaquen los beneficios que se obtienen si se lleva a cabo una correcta ejecución con parámetros a cumplir y que se apliquen en operaciones seguras, siendo de esta manera productiva y eficiente.
3. Los puntos fundamentales con sus regularidades, permiten identificar el tipo de aerogenerador a seleccionar de acuerdo a su adaptabilidad en los entornos urbanos siendo este el Aerogenerador RX-V400-S.
4. Se selecciona el software a utilizar siendo este el SAP2000 por la versatilidad y los requerimientos de sistemas que posee, uno de los más utilizados para el diseño.

CAPÍTULO II: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO NO. 50 EN EL REPARTO HERMANOS AGUILERA, CIUDAD DE HOLGUÍN.

Introducción al capítulo

Son muchas las causas que pueden producir el fallo estructural de una edificación. Cualquier análisis que se realice debe tener en cuenta las condiciones constructivas y de apoyo del inmueble, para determinar las soluciones estructurales a los problemas que se presenten.

II.1 Análisis del objeto de estudio

El edificio No.50 se encuentra ubicado en la Avenida Los Libertadores reparto Hermanos Aguilera, ciudad de Holguín. El mismo se construyó en el año 2012 y se proyectó por la Empresa Militar de Proyectos de Ingeniería de las Fuerzas Armadas Revolucionarias (EMPI-FAR). El sistema constructivo al cual pertenece es el de Formaletas S.A. (FORSA), cuenta con una cimentación en balsa y los muros son de hormigón armado y todos tienen función estructural.

El estado constructivo actual del inmueble es relativamente bueno, donde no se aprecian daños ni afectaciones provocadas por el tiempo. El edificio es un sistema monolítico constituido por dos bloques de viviendas separados por juntas en la escalera. Se construye de 4 niveles y cuenta con una altura total de 10,48 m siendo la altura por planta de 2,62 m.

- Sistema Constructivo FORSA

Desde su inicio en el año 1995 el sistema colombiano FORSA tiene gran aceptación en el mercado de la construcción, no solo en Colombia, sino también en varios países de Sudamérica, Centroamérica, el Caribe y España. El sistema permite alcanzar gran velocidad pues reduce el tiempo de ejecución de la vivienda a menos de la mitad en comparación con el sistema tradicional, ya que se puede obtener una casa por día al realizar los ciclos de vaciados diarios.

Con el sistema se construye desde la casa más pequeña hasta el edificio más alto, además de cárceles, bodegas, edificaciones con sótanos para parqueo, entre otros.

Es muy simple en su uso y con muy pocos accesorios. El personal que mueve los moldes solo requiere un mínimo de entrenamiento y no se necesita usar grúas.

El nivel de acabado sobre la superficie para muros puede ser liso o con textura, y se disminuyen los desperdicios de obra y materiales en acabados. Cuando se usa concreto, la pasta que tiene normalmente 3 mm de espesor se aplica directamente sobre la superficie e incluso puede dejarse aparente, disminuyendo los costos de terminación.

Se puede fundir en concreto simultáneamente los muros, las losas y las culatas de una vivienda, proveyendo un seguro comportamiento sísmico resistente que se utiliza y comprueba en el mundo. Por lo que en la eventualidad de un terremoto, de un temblor o de un huracán, no solamente la inversión es más segura sino que el valor más importante, la familia, tiene una mayor protección¹⁴ (Figura II.1).



Figura II.1: Edificio multifamiliar que se construye con el sistema FORSA
Fuente: http://www.larepublica.co/comercio-externo/m%C3%A1s-de-22-pa%C3%ADses-comprende-el-mercado-internacional-de-forsa_109956

El sistema FORSA presenta grandes ventajas en las que se encuentran:

¹⁴ Consultado en Más de 22 países comprende el mercado internacional de Forsa el 10 de febrero del 2017 Disponible en: http://www.larepublica.co/comercio-externo/m%C3%A1s-de-22-pa%C3%ADses-comprende-el-mercado-internacional-de-forsa_109956

- Absoluta monoliticidad entre losas, muros y fachadas.
- Mayor rigidez de la estructura.
- Total empotramiento de elementos no estructurales.
- Disminución de empates entre materiales.
- Menor espesor de muros y losas.
- Menor consumo de materiales por el uso de muros divisorios como portantes.
- No consumo de material aligerante en las losas, ni material para cielo raso.
- No consumo de revoques, al aprovechar la superficie más tersa que se obtiene en muros y losas.
- Menor cantidad de refuerzo requerida por ser más liviana la estructura y menores las luces en las losas.
- Menores costos de gastos generales al disminuir el tiempo de construcción.
- Menores costos financieros al disminuir el tiempo de entrega de los proyectos.
- El sistema no consume madera en los tableros, ni en los casetones de las losas aligeradas.
- Se minimiza la generación de escombros.
- Al no requerir grúa se emplean más operarios por cuadrilla de construcción lo que ayuda a generar mayor fuente de empleo.

Los productos FORSA ofrecen alta maniobrabilidad y bajo peso, dos ventajas primordiales al momento de construir. Un panel de 2.60 m de altura y 90 cm de ancho, pesa aproximadamente 40 kg, por lo que no requiere equipo adicional.

Lo anterior ofrece una ventaja capital, la resistencia al pandeo, lo que garantiza un correcto acabado y el perfecto alineamiento vertical de las estructuras. Permite la construcción de todo tipo de espacios, muros diagonales, remates con tipo cornisa, integrados monolíticamente con la estructura. Además se puede variar los espesores de muro de acuerdo a la determinación de los cálculos estructurales y permite el uso de elementos curvos en fachadas. Con el sistema de formaletas FORSA se puede fundir losas planas macizas, aligeradas o losas inclinadas. El peso liviano de los

paneles FORSA facilita cada uno de los pasos de armado y desencofre ya que un solo hombre puede sostener un panel.

Sin embargo este sistema también presenta sus limitaciones, entre las que se encuentra:

- El costo de las formaletas, pues se requiere un número suficiente de usos para realizar la inversión.
- El inadecuado manejo de antepechos puede generar fisuras por cambio de rigidez lo que implica inducir ranuras en sitios adecuados o aumentar refuerzo en esquinas.
- Deben recubrirse con mallas las tuberías embebidas superficiales para evitar fisuración de muros y cielos.
- Es posible hacer celdas de parqueo en sótanos, pero con limitantes. Requiere más estudio el diseño.
- Las ranuras de las corbatas y las inducidas deben sellarse desde el exterior para evitar el ingreso de agua al muro.
- Se recomienda colocar barreras de morteros de pendientes bajo el manto o impermeable en las cubiertas.
- Las medidas de temperaturas hechas al interior de viviendas de último piso construidas con el sistema muestran un incremento de 1.5 grados con respecto al sistema convencional. Estas diferencias se amortiguan con el uso de una barrera de calor sobre la losa de cubierta y bajo la impermeabilización.
- Un muro macizo de 8 a 10 cm solo puede atenuar hasta 50 decibeles.
- El sistema puede generar fisuras por cambios en rigidez en vanos de ventanas y por retracción de muros excesivamente largos (más de 5 m). Por tal motivo es necesario inducirlas creando ranuras en los sitios adecuados.

II.2 Revisión del estado estructural del edificio ante los efectos generados por la integración de los aerogeneradores

Para realizar la revisión estructural del edificio No. 50 ante los efectos generados por la integración de los aerogeneradores, es necesario tener en cuenta ciertos parámetros. Entre los que se encuentran las características del material, las condiciones de apoyo, el estado de carga al cual está sometido el edificio, las secciones transversales de los elementos que lo componen. A partir de estos datos se puede realizar el modelo de la estructura con ayuda del software SAP2000 y determinar si la estructura es capaz de resistir los nuevos estados de carga.

II.2.1 Análisis geométrico

- Modelo de los materiales

Se trabaja con modelos de materiales elásticos y lineales tanto para el acero como para el hormigón. Los parámetros necesarios para definirlos son la resistencia característica del hormigón a compresión (R'_{bk}), el módulo de deformación longitudinal a compresión del hormigón (E'_{b}), el coeficiente de Poisson (γ), el peso por unidad de volumen (Peso/Volumen). En el caso del hormigón estos parámetros tienen los siguientes valores:

- $R'_{bk} = 25 \text{ Mpa}$
- $E'_{b} = 24000000 \text{ kN/m}^2$
- $\gamma = 0,17$
- $\text{Peso/Volumen} = 25 \text{ kN/m}^3$

- Modelo de las condiciones de apoyo

Debido a que los muros y losas se hormigonan in situ las uniones entre estos elementos se consideran monolíticas, debido a esto todas las uniones entre los elementos de área (Shell) se consideran continuas. También se considera continuo entre los elementos Shell de los muros y los elementos lineales (Frame) de la cimentación. En el caso de esta última las condiciones de apoyo se modelan mediante resortes elásticos como se indica a continuación.

– Modelación del suelo

En el modelo se considera la interacción suelo - estructura apoyada sobre un sistema de resortes elásticos cuya rigidez está determinada por la rigidez del suelo dada por el coeficiente de balasto.

$$K_{resorte} = K_{balasto} * B * L \quad (\text{Ec.II.1}) \text{Fuente: Benítez Leiva (2011)}$$

Donde:

$K_{balasto}$: Coeficiente de balasto del suelo (dado en las investigaciones ingeniero geológicas)

B : Ancho de la cimentación ($B = 1,2$ m)

L : Distancia entre nodos (definida por el tamaño de la discretización utilizada)

- Cargas tomadas en cuenta para el análisis de la estructura.

– Carga de viento

– Esta carga se determina conforme a lo establecido en la norma cubana NC 285:2003 Carga de viento. Método de cálculo. Donde la carga de viento se determina por la siguiente ecuación:

$$q = q_{10} * C_t * C_s * C_h * C_r * C_{ra} * C_f \quad (\text{Ec.II.2})(\text{NC 285:2003})$$

– Donde:

– q_{10} : Presión básica del viento (kN/m^2)

– C_t : Coeficiente de recurrencia

– C_s : Coeficiente de topografía o sitio

– C_h : Coeficiente de altura

– C_r : Coeficiente de ráfaga

– C_{ra} : Coeficiente de reducción

– C_f : Coeficiente de forma

– A continuación se exponen los valores en dependencia de las especificaciones de la norma. El valor de $q_{10} = 0,9 \text{ kN/m}^2$ para la zona oriental de Cuba. El $C_t =$

- 1, correspondiente a un período de recurrencia de 50 años. El $C_s = 1$, por ser una zona de sitio normal.
- El coeficiente de altura se toma según el tipo de terreno, en este caso es un terreno tipo B. Para el edificio en cuestión hasta los 5 m de altura la presión del viento es constante y $C_h = 0,48$ (puntos 1 y 3), a partir de ahí aumenta hasta los 10 m de altura (punto 2) donde $C_h = 0,65$. En la figura II.2 se muestra el esquema de la supuesta variación de la presión del viento.

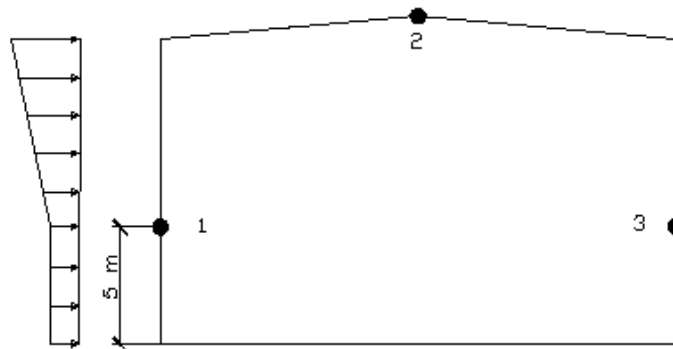


Figura II.2: Variación supuesta de la presión del viento con la altura
Fuente: Elaboración propia

- Como el terreno es de tipo B y la altura del edificio de 14 m el $C_r = 1,36$. El coeficiente de reducción por área expuesta tiene un valor único para el edificio u obra. En este caso $C_{ra} = 0,78$ porque la altura máxima es menor de 30 m y la dimensión mayor de la superficie expuesta al viento es de 19,3 m.
- Los coeficientes de formas o aerodinámicos se toman de los esquemas que se utilizan para cubiertas a dos aguas, y según la dirección del viento se toma el caso 2 (Figura II.3).

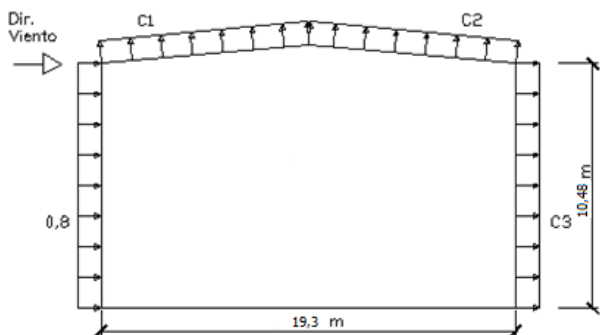


Figura II.3: Esquema de los coeficientes de forma o aerodinámicos
Fuente: Elaboración propia

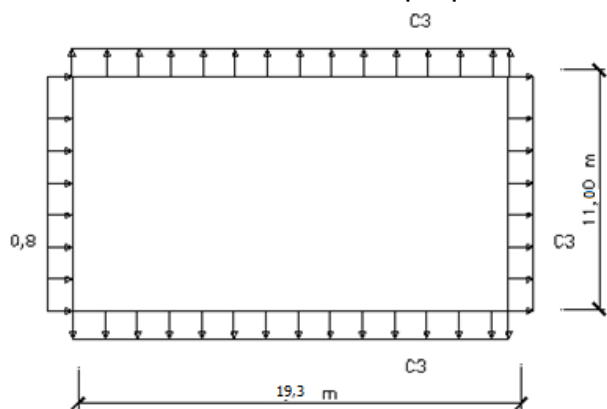


Figura II.4: Esquema de los coeficientes de forma o aerodinámicos
Fuente: Elaboración propia

Inclinación de la cubierta $\alpha = 5,18^\circ$

- $H/L = 10,48/19,3 = 0,54$
- $C1 = -0,5418$
- $C2 = -0,418$
- $B/L = 11/19,3 = 0,57$
- $C3 = -0,418$

En la tabla II.1 se resume los valores de la carga de viento obtenidos para la acción del viento en dirección de X.

Tabla II.1: Cargas de viento en la dirección de X

Pto.	q10	Cs	Ch	Cr	Ct	Cf	Cra	qv(KN/m ²)
1	0,9	1	0,48	1,36	1	0,8	0,78	0,37
2	0,9	1	0,65	1,36	1	-0,542	0,78	-0,25
						-0,418	0,78	-0,22
3	0,9	1	0,48	1,36	1	-0,418	0,78	-0,19
1	0,9	1	0,48	1,36	1	0,8	0,78	0,37
2	0,9	1	0,65	1,36	1	-0,418	0,78	-0,34
3	0,9	1	0,48	1,36	1	-0,418	0,78	-0,26

Fuente: Elaboración propia

Viento en dirección transversal

En el esquema siguiente se muestran los coeficientes de forma aerodinámicos para la acción del viento en dirección de Y (Figura II.5).

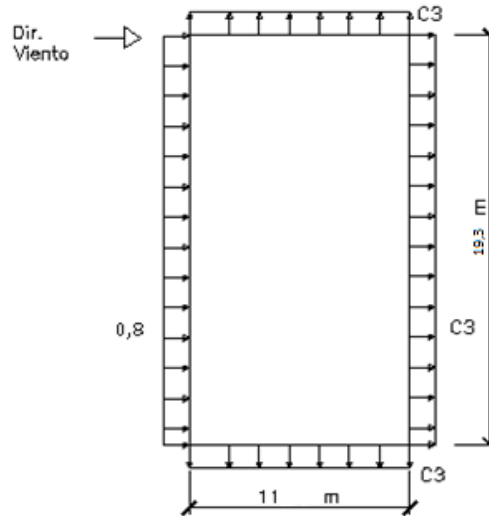


Figura II.5: Esquema de los coeficientes de forma o aerodinámicos

Fuente: Elaboración propia

$$H/B = 10,48/11 = 0,947$$

$$L/B = 19,3/11 = 1,75$$

$$C3 = -0,4918$$

En la tabla II.2, se muestran los valores de cargas de viento obtenidos para la acción del viento en dirección de Y.

Tabla II.2: Cargas de viento en la dirección de Y

Pto.	q10	Cs	Ch	Cr	Ct	Cf	Cra	qv(KN/m ²)
1	0,9	1	0,48	1,36	1	0,8	0,78	0,37
2	0,9	1	0,65	1,36	1	-0,4918	0,78	-0,305
3	0,9	1	0,48	1,36	1	-0,4918	0,78	-0,255

Fuente: Elaboración propia

- Cargas de viento no extremo

La $q_{10} = 0,50 \text{ kN/m}^2$ para cualquier altura, sitio y topografía. En la tabla II.3 se muestran los valores de cargas de viento no extremo.

Tabla II.3: Cargas de viento no extremos

Cf	q10	qv no extremo en (kN/m ²)
0,8	0,5	0,4
-0,638	0,5	-0,319
-0,418	0,5	-0,209
-0,418	0,5	-0,209
-0,492	0,5	-0,246

Fuente: Elaboración propia

- Modelación de la acción sísmica

Esta carga se determina conforme a lo establecido en la Norma Cubana NC 46:2014 Construcciones sismo resistente. Requisitos básicos para el diseño y construcción.

El programa SAP 2000NL calcula automáticamente las fuerzas de inercia que se generan en las nudos de la estructura a partir de un espectro de respuesta que introduce el usuario. Estas masas se definen en cada nudo de acuerdo a las áreas tributarias del nudo y a las cargas que introduce el usuario. Los porcentos de estas cargas que son convertidos en masas también deben ser especificados por el ingeniero estructural. En el caso de análisis se utilizaron los siguientes valores establecidos en la NC 46:2014:

- Carga Permanente: 100%
- Carga de uso de larga duración: 80%
- Carga de uso de corta duración: 50%

De acuerdo a este código la ciudad de Holguín está ubicada en la zona 2 (de peligro sísmico bajo) donde la aceleración máxima esperada es de 0.3 g. Se consideró el espectro de diseño correspondiente al suelo S2 para el cual: $F_a = 0.8$, $F_v = 0.8$, $S_0 = 0.181$, $S_s = 0.349$, $S_1 = 0.128$, según se establece en el código de diseño cubano.

Donde:

S a: Son los valores de la aceleración espectral horizontal máxima

S s: Son los valores de la aceleración espectral para periodos cortos

S 1: Son los valores de la aceleración espectral para periodos largos

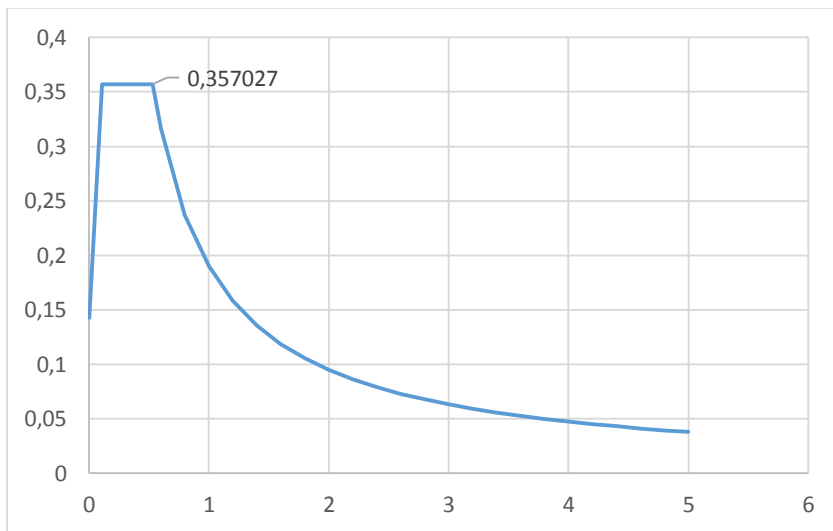


Figura II.6. Espectro de diseño utilizado

Fuente: Elaboración propia

– Carga dinámica

En la rosa de viento se observa que las velocidades en todas las direcciones se encuentran entre 8 km/h y 14 km/h, con dirección predominante del Este con más de un 40 % de ocurrencia

Esta carga se ha determinado mediante una distribución de Weibull de dos parámetros (forma = 2,12809 y escala = 12,6593), realizando una interpolación a partir de los datos de viento del año 2015. (Figura II.7) Se tuvieron en cuenta 471 valores de velocidad

con un rango desde 0,5 a 28,1 m/s. El procedimiento se realizó con el Software StatGraphics XV para una mayor credibilidad.

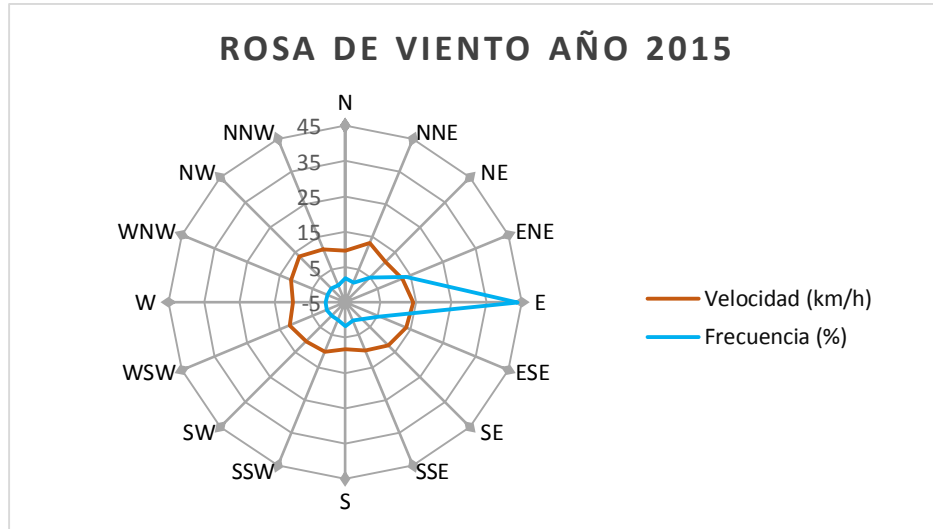


Figura II.7 Rosa de velocidades media y frecuencia por dirección año 2015.

Fuente: Pérez González, Lizania (2016). Tesis al título de Ingeniero Civil

Mediante el StatGraphics se puede probar si las distribuciones se ajustan adecuadamente a los datos. También se puede evaluar visualmente que tan bien se ajustan las distribuciones y con otras opciones se calculó y desplegaron las áreas de colas y valores críticos para la distribución.

Una vez hecha la distribución se le introdujo al SAP2000 mediante un Historial de tiempo, en el cual se puede apreciar los efectos del viento en un período de tiempo.

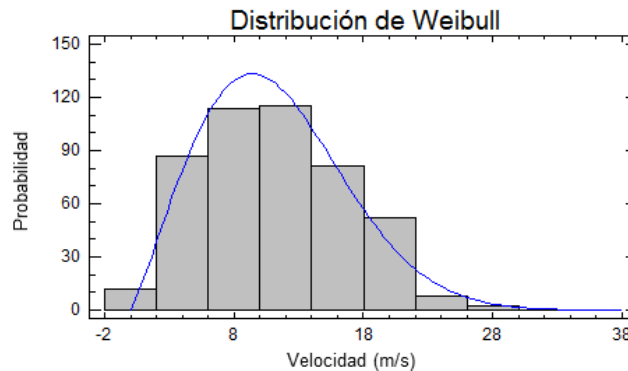


Figura II.8 Distribución de probabilidades de velocidades del viento año 2015

Fuente: Elaboración propia

– Combinaciones de carga

Estas se realizaron conforme a lo establecido en la NC 450:2006 Edificaciones. Factores de carga o ponderación. Combinaciones. Las combinaciones de cargas realizadas (para el estado límite último) fueron las siguientes:

- 1,4 G
- 1,2 G + 1,6 Q + 0,5 Qc + 1,6Qd
- 1,2 G + 1,6 Qc + 0,5 Q + 1,6Qd
- 1,2 G + 0,5 Q + 0,5 Qc + 1,6Qd
- 1,2 G + 1,4 Ex + 1,4(0.3) Ey + 0,5 Q + 0,2 Qc + 1,6Qd
- 1,2 G + 1,4 Ey + 1,4(0.3) Ex + 0,5 Q + 0,2 Qc + 1,6Qd
- 0,9 G + 1,4 Ex + 1,4(0.3) Ey
- 0,9 G + 1,4 Ey + 1,4(0.3) Ex
- 1,2 G + 1,6 Qc + 0,8 Wx
- 1,2 G + 1,6 Qc + 0,8 Wy
- 1,2 G + 1,4 Wx + 0,5 Q + 0,5 Qc + 1,6Qd
- 1,2 G + 1,4 Wy + 0,5 Q + 0,5 Qc + 1,6Qd
- 0,9 G + 1,4 Wx
- 0,9 G + 1,4 Wy
- Envolverte de todas las combinaciones

Donde:

G: carga permanente

Q: carga de uso en entresijos

Qc: carga de usos en cubierta

Qd: carga dinámica generada por los aerogeneradores

Ex: carga de sismo en dirección X

Ey: carga de sismo en dirección Y

Wx: carga de viento en dirección X

WY: carga de viento en dirección Y

- Método de cálculo

El análisis se ha efectuado por el método de análisis modal simplificado como Método del Espectro de Respuesta utilizando como fórmula de superposición la Combinación Cuadrática Completa (CQC), se consideraron los 12 primeros modos de vibración. Debido a que el sistema está formado por muros y losas de hormigón armado (elementos superficiales) se ha utilizado el Método de los Elementos Finitos implementado en el software SAP 2000 versión 15.0.

El modelo tridimensional de elementos finitos del edificio en cuestión tiene las siguientes propiedades:

10466 nudos

10352 SHELLs (elementos superficiales: muros y losas)

En la figura II.9 se muestra el modelo tridimensional del edificio.

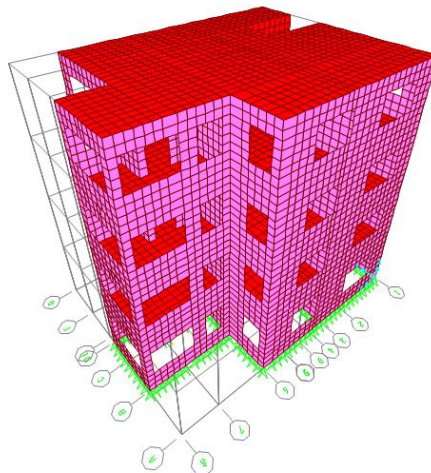


Figura II.9 Modelo en 3D del edificio elaborado en el programa SAP2000 NL

Fuente: Elaboración propia

II.3 Análisis de resultados

- Chequeo de las losas de entepiso y cubierta

Para el chequeo de las losas de entepiso y cubierta se procede con las herramientas del software SAP 2000, primero se define los grupos de elementos a analizar, luego mediante el comando Frame Seccion se realiza el diseño de las losas de entepiso y cubierta. Posteriormente se definen los grupos a analizar y se obtienen los esfuerzos actuantes y momentos de las secciones.

Se calcularon los momentos resistentes últimos de las losas considerando las distintas mallas de refuerzo electrosoldadas disponibles. Se comprobó que las losas cumplen por flexión, pues resisten los momentos que actúan en ellas cuando se refuerzan con las mallas electrosoldadas. (Figura II.10)

Para el chequeo de las losas se tienen en cuenta los siguientes datos:

- Recubrimiento = 3 cm
- $F_c = 25 \text{ MPa}$
- Acero G – 40
- $C_u = 3 \text{ kN/m}$
- Control de la calidad: Normal

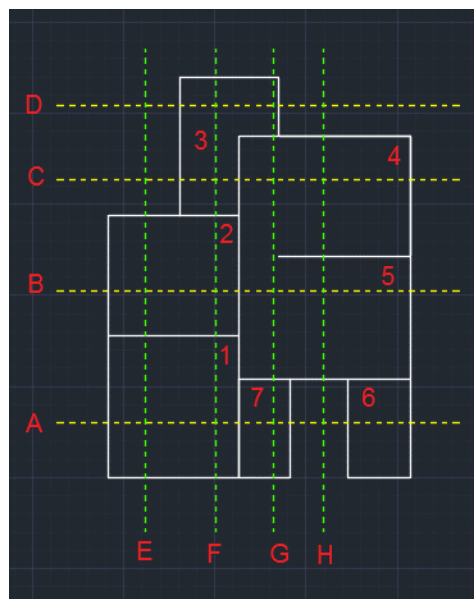


Figura II.10 Distribución de las líneas de diseño

Fuente: Elaboración propia

– Secciones de losa utilizadas

Para la selección de las secciones se escogen de diferentes lugares de la losa como son los extremos y la parte central, debido a que es donde se obtienen los mayores valores de momentos. Las losas usadas son de secciones de 0,5 m X 0,3 m y de 0,8 m X 0,3 m. Con refuerzo mínimo en la sección 1 y refuerzo normal en la sección 2 (Figura II.11, II.12).

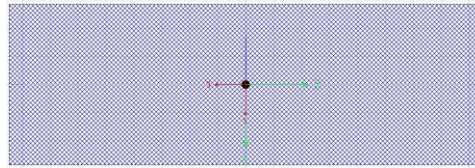


Figura II.11 Sección con refuerzo mínimo

Fuente. Elaboración propia

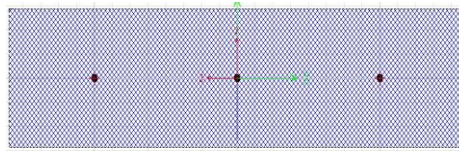


Figura II.12 Sección con refuerzo normal

Fuente. Elaboración propia

– Comprobación de losa entrepiso No. 1

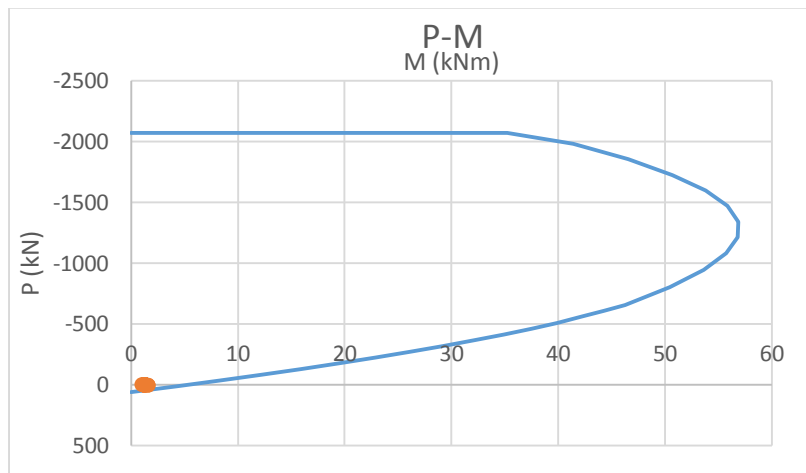


Figura II.13 Gráfico de deformaciones del hormigón según la sección 2 para la primera losa de entrepiso

Fuente. Elaboración propia

– Comprobación de losa entrepiso No. 2

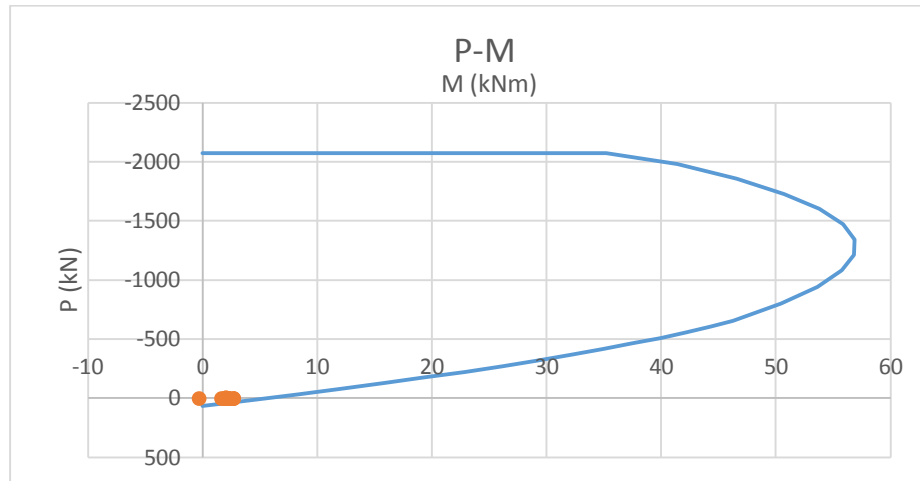


Figura II.14 Gráfico de deformaciones del hormigón según la sección 2 para la segunda losa de entrepiso

Fuente. Elaboración propia

– Comprobación de losa entrepiso No. 3

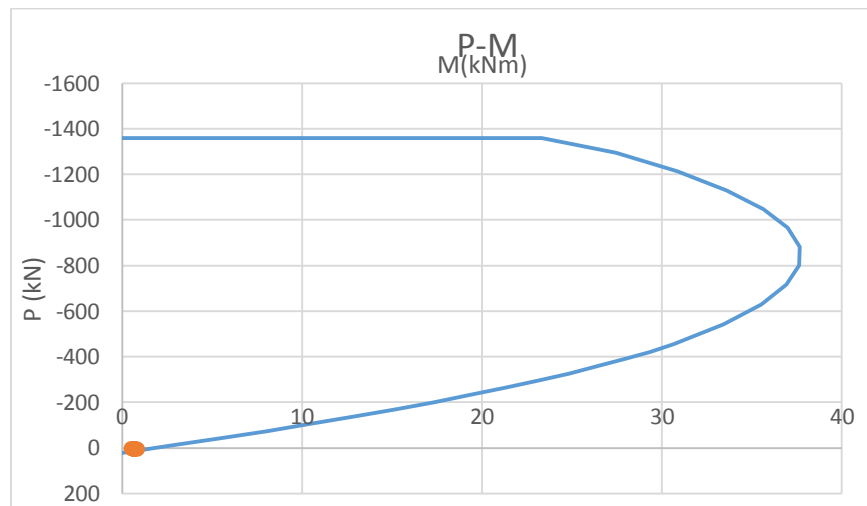


Figura II.15 Gráfico de deformaciones del hormigón según la sección 1 para la tercera losa de entrepiso

Fuente. Elaboración propia

– Comprobación de losa de cubierta No. 1

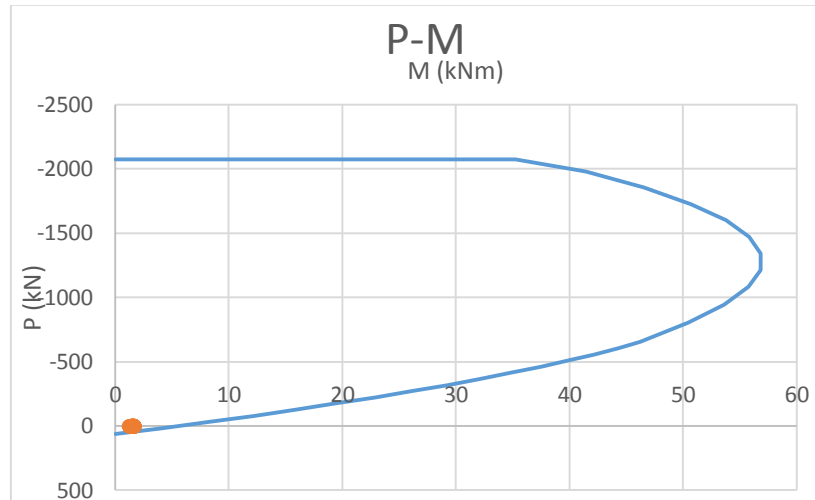


Figura II.16 Gráfico de deformaciones del hormigon según la seccion 2 para la tercera losa de entrepiso

Fuente. Elaboración propia

– Comprobación de losa de cubierta No. 2

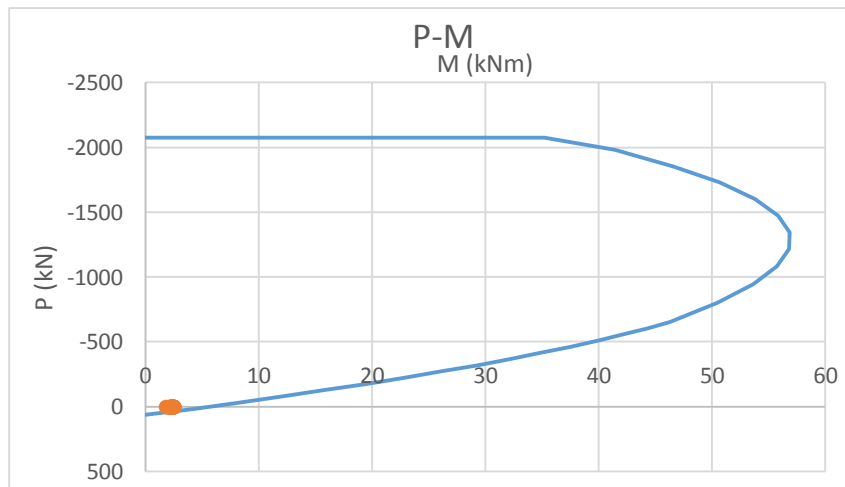


Figura II.17 Gráfico de deformaciones del hormigon según la seccion 1 para la losa de cubierta

Fuente. Elaboración propia

– Comprobación de losa de cubierta No. 3

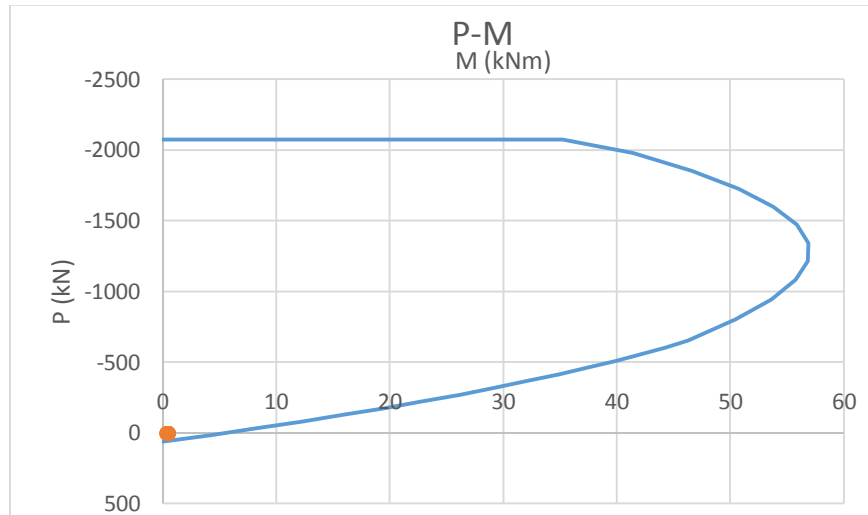


Figura II.18 Gráfico de deformaciones del hormigón según la sección 1 para la losa de cubierta
Fuente. Elaboración propia

– Comprobación de losa de cubierta No. 3

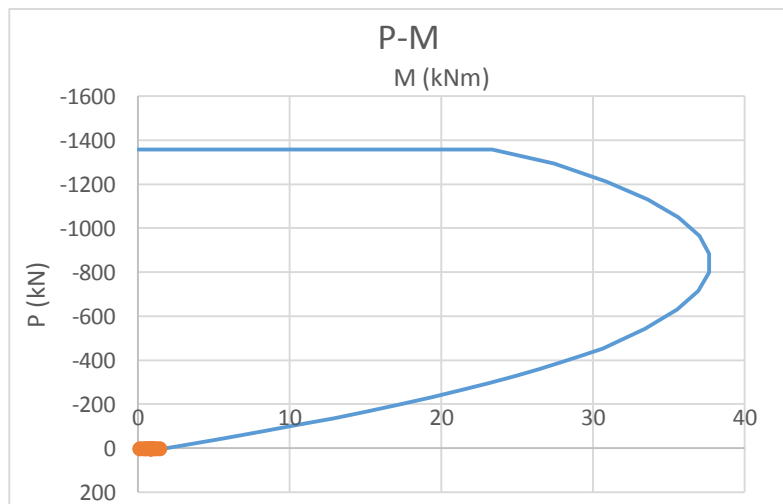


Figura II.19 Gráfico de deformaciones del hormigón según la sección 1 para la losa de cubierta
Fuente. Elaboración propia

– Comprobación de losa de cubierta No. 4

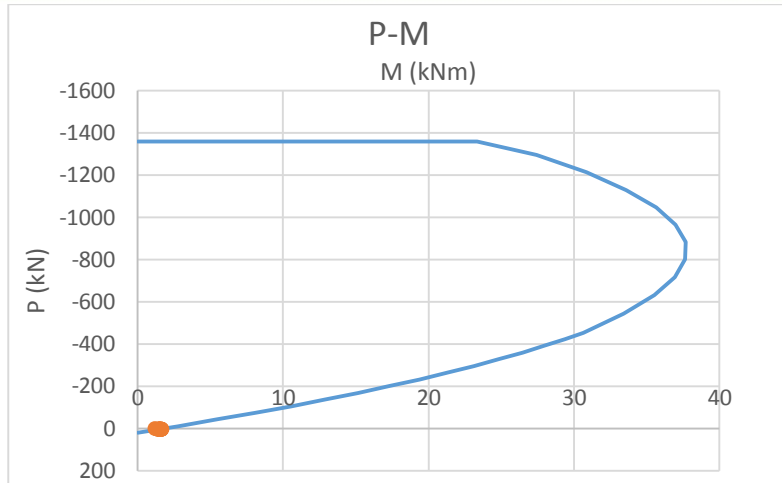


Figura II.20 Gráfico de deformaciones del hormigon según la seccion 1 para la losa de cubierta
Fuente. Elaboración propia

- Comprobación de losa de cubierta No. 5

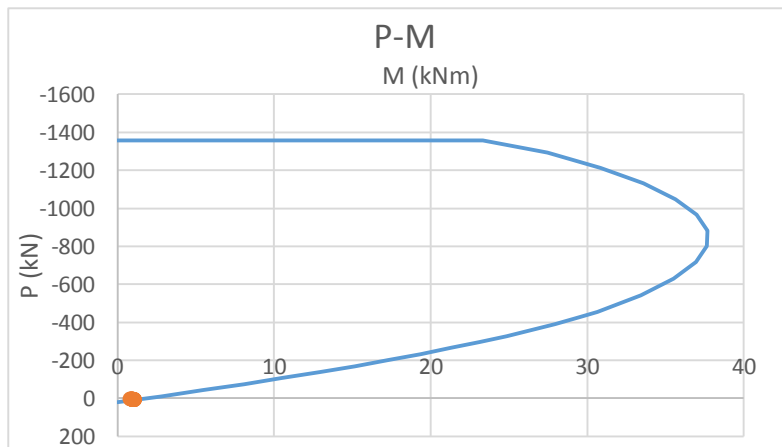


Figura II.21 Gráfico de deformaciones del hormigon según la seccion 1 para la losa de cubierta
Fuente. Elaboración propia

- Chequeo de los muros

Para la selección de las secciones se escogen de diferentes partes de los muros como son los extremos y la parte central, debido a que es en estos lugares donde se obtiene mayor los axiales.

- Secciones de muros utilizados

Las secciones de los muros usados son de secciones de 0,5 m X 0,3 m y de 0,8 m X 0,3 m. Con refuerzo mínimo en la sección 1 y refuerzo normal en la sección 2. (Figura II.22, II.23).

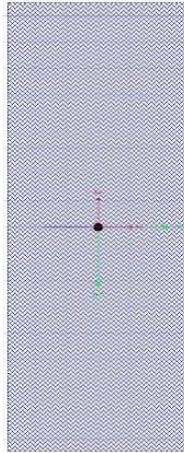


Figura II.22 Sección con refuerzo mínimo

Fuente. Elaboración propia

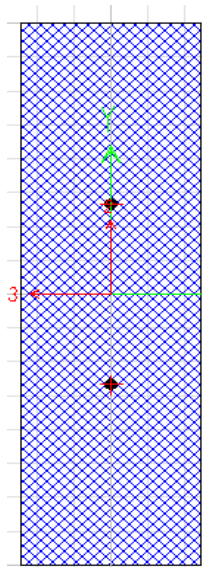


Figura II.23 Sección con refuerzo normal

Fuente. Elaboración propia

- Comprobación del muro 1

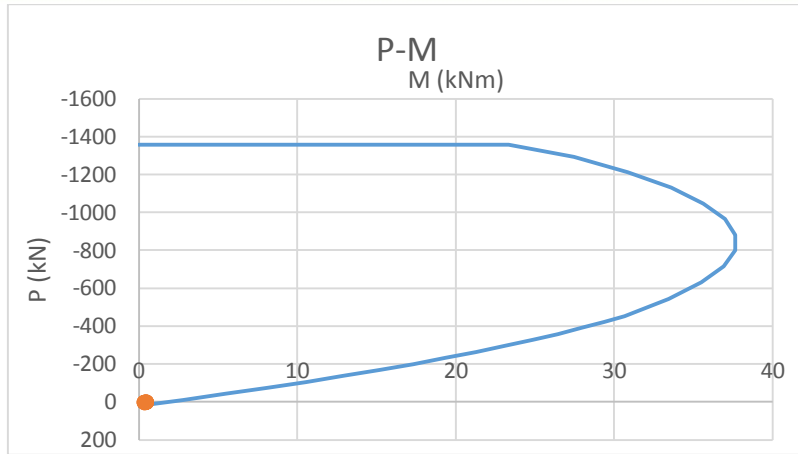


Figura II.24 Gráfico de deformaciones del hormigón según la sección 1 para el muro en el último nivel.

Fuente. Elaboración propia

- Comprobación del muro 2

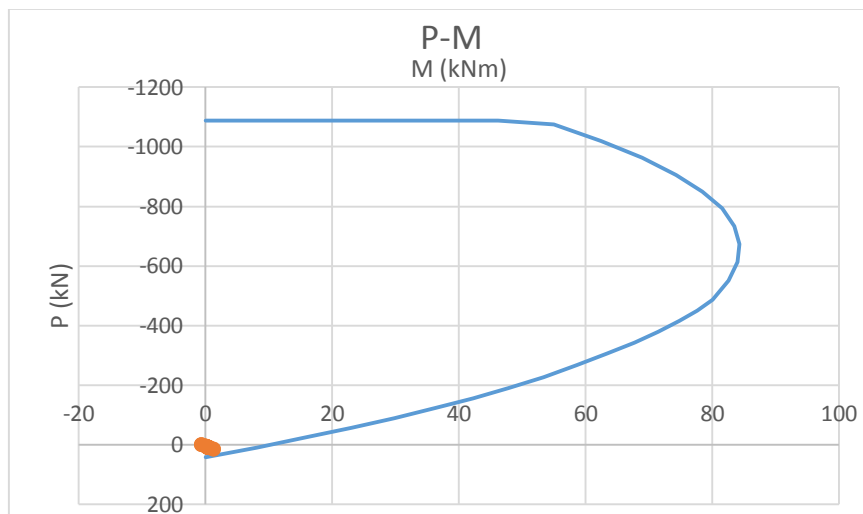


Figura II.25 Gráfico de deformaciones del hormigón según la sección 2 para el muro en el 2º nivel.

Fuente. Elaboración propia

- Comprobación del muro 3

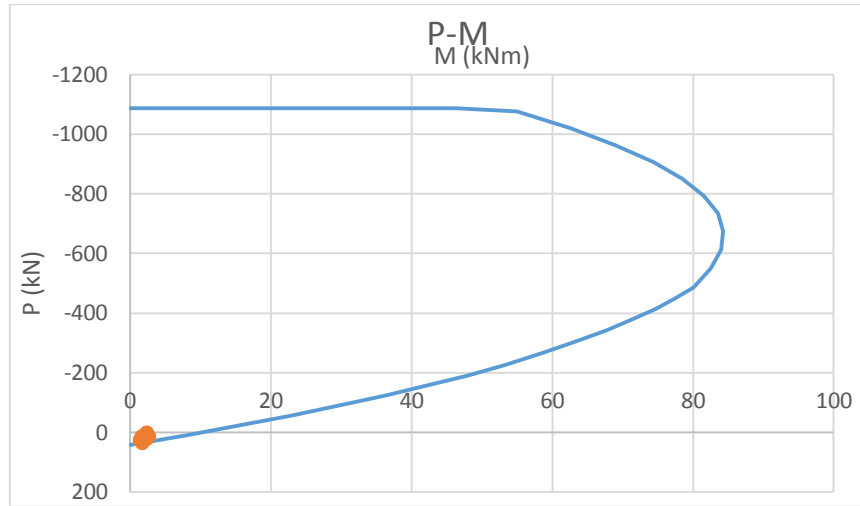


Figura II.26 Gráfico de deformaciones del hormigon según la seccion 2 para el muro en el 1 nivel.

Fuente. Elaboración propia

Conclusiones del capítulo

1. Se realiza el modelo del edificio No. 50 del reparto Hermanos Aguilera con ayuda del software Sap2000, con el cual se obtienen los valores de momento, cortante y axial en las diferentes ejes de las secciones de los elementos a analizar.
2. Se determina los efectos dinámico producto a la modelación de los aerogeneradores mediante el software StarGrafic XV Centurium, y se comprueba el efecto que producen en la estructura mediante un análisis estadístico.
3. Se tiene en cuenta el efecto dinámico en las combinaciones de cargas, y se comprueba que la estructura resiste los efectos provocados por los aerogeneradores.

CONCLUSIONES GENERALES

1. La determinación de los antecedentes históricos de la integración de los aerogeneradores en edificaciones permite una correcta selección del aerogenerador a integrar para lograr una óptima relación de peso y capacidad de generación.
2. Los fundamentos teóricos y metodológicos caracterizados permiten alcanzar una correcta comprensión de los efectos generados por los aerogeneradores en las estructuras así como su comportamiento ante la integración.
3. El análisis estructural del edificio No.50 del sistema FORSA en el reparto Hermanos Aguilera ante los efectos dinámicos generados por la implementación de los aerogeneradores en las azoteas demuestra las capacidades estructurales que posee el edificio ante las nuevas combinaciones de cargas y ser el primer edificio autosustentable a nivel energético de Holguín.

RECOMENDACIONES

- Divulgar los resultados obtenidos en diferentes eventos nacionales e internacionales relacionados con el tema de Fuentes Renovables de Energías debido a la importancia y pertinencia del tema.
- Sugerir a la Empresa Eléctrica, la búsqueda de financiamiento por medio de proyectos internacionales para la integración de los aerogeneradores en el edificio No. 50 del reparto Hermano Aguilera.
- Proponer al Departamento de Construcciones de la Universidad de Holguín, continuar profundizando en el tema de investigación con la determinación del costo de inversión y el estudio de factibilidad para la integración de los aerogeneradores y expandir el tema de investigación hacia otros sistemas constructivos.

BIBLIOGRAFÍA

1. 1kw gird kit de turbina eólica de eje vertical para uso en el hogar para la venta (VAWT). Consultado el 15 de septiembre del 2016 Disponible en <https://spanish.alibaba.com/product-detail/1kw-off-gird-vertical-axis-wind-turbine-for-home-use-for-sale-60524828447.html>
2. 300w En vertical axis wind turbine for home use Consultado el 20 de noviembre del 2016. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/300w-vertical-axis-wind-turbine-for-home-use-60193937267.html>
3. 300w vertical axis wind turbine for home use. Consultado el 18 de noviembre del 2016. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/300w-vertical-axis-wind-turbine-for-home-use-60193937267.html>
4. Aerogenerador de eje horizontal o vertical. Consultado el 18 de noviembre del 2016. Disponible en: <http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com/2012/07/aerogenerador-de-eje-horizontal-o-vertical.html>
5. Ahorro de millones de dólares mediante generación eólica. Consultado el 16 de diciembre del 2016 Disponible en <http://www.radiohc.cu/pt/noticias/ciencias/2541-ahorro-de-millones-de-dolares-mediante-generacion-eolica>
6. Arquitectura Bioclimática. Consultado el 15 de marzo del 2017 Disponible en: <http://www.gtd.es/es/blog/una-empresa-cantabra-de-tecnologia-crea-un-aerogenerador-para-edificios>
7. Cassano M Arturo(2009) ANALISIS DE ESTRUCTURAS BAJO ACCIONES DINÁMICAS
8. CONSTRUIR PUEDE SER MAS RENTABLE DE LO QUE USTED CREE. Consultado el 20 de noviembre del 2016. Disponible en: https://www.agencia-alemana.com.ni/files/1113/5140/0048/forsa_alum.pdf



9. Cuba busca energía eólica con capital extranjero. Consultado el 15 de noviembre del 2016 Disponible en: <http://www.evwind.com/2015/08/09/cuba-busca-energia-eolica-con-capital-extranjero>
10. Distribución de Weibull. Consultado el 3 de febrero del 2017 Disponible en: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/probability-distributions-and-random-data/distributions/weibull-distribution/>
11. El sector de la Construcción en Cuba: Retos y Realidades. Consultado el 10 de febrero del 2017 Disponible en: <http://www.cubadebate.cu/especiales/2013/09/19/el-sector-de-la-construccion-en-cuba-retos-y-realidades/#.WJyx1slkBTw>
12. En 20 años el mercado de la energía eólica mundial se multiplicará por 10. Consultado el 20 de noviembre del 2016. Disponible en: <http://www.energiza.org/eolica/21-eolica/813-en-20-anos-el-mercado-de-la-energia-eolica-mundial-se-multiplicara-por-10>
13. En aumento la utilización de energías renovables. Consultado el 16 de diciembre del 2016 Disponible en <http://www.radioholguin.icrt.cu/ciencia/item/560-en-aumento-la-utilizacion-de-energias-renovables>
14. Energía eólica ahorra seis mil toneladas de combustible en Holguín. Consultado el 15 de noviembre del 2016 Disponible en: <http://www.radioangulo.cu/holguin/1766-energia-eolica-ahorra-seis-mil-toneladas-de-combustible-en-holguin>
15. Energía eólica beneficia al Sistema Eléctrico cubano. Consultado el 15 de noviembre del 2016 Disponible en: <https://cienciadecuba.wordpress.com/2012/01/18/energia-eolica-beneficia-al-sistema-electrico-cubano-fotos>



16. Energía eólica entre las de mayor dinámica en Cuba. Consultado el 12 de octubre del 2016 Disponible en <http://www.asoprodem.org.ve/index.php/al-dia/noticias/item/296-energia-eolica-entre-las-de-mayor-dinamica-en-cuba>
17. Energía eólica: futuro garantizado. Consultado el 12 de octubre del 2016 Disponible en: <http://etecnologia.com/medio-ambiente/energia-eolica>
18. Energías renovables y limpias: solar, eólica, geotérmica, hidráulica, mareomotriz. Consultado el 12 de enero del 2017 Disponible en <http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com/2012/07/aerogenerador-de-eje-horizontal-o-vertical.html>
19. GWEC, 2000-2015
20. Half-Year Report, WWEA, 2015.
21. Importante desarrollo acelerado de la energía eólica en Cuba. Consultado el 25 de octubre del 2016. Disponible en: <http://www.cubadebate.cu/noticias/2016/09/08/importante-desarrollo-acelerado-de-la-energia-eolica-en-cuba/#.WDSA0PD47MQ>
22. Integración Energía Eólica. Consultado el 15 de marzo del 2017 Disponible en: <https://www.construible.es/2012/08/31/integracion-energia-eolica>
23. La integración urbana de los mniaerogeneradores. Consultado el 5 de febrero del 2017 Disponible en: <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/posgrado/09-TRABAJO%20FINAL-Garcia-Saiz.pdf>
24. Los molinos de viento saltan del campo a las azoteas Consultado el 18 de noviembre del 2016. Disponible en: <http://www.taringa.net/posts/economia-negocios/11702608/Los-molinos-de-viento-saltan-del-campo-a-las-azoteas.html>
25. Los países de mayor producción de energía eólica. Consultado el 13 de diciembre del 2016. Disponible en: <http://www.infobae.com/2016/03/13/1796528-los-paises-mayor-produccion-energia-eolica/>

26. Los países que más energía eólica producen en la actualidad. Consultado el 12 de octubre del 2016 Disponible en <http://www.renovablesverdes.com/los-paises-que-mas-energia-eolica-producen-en-la-actualidad/>
27. Más de 22 países comprende el mercado internacional de Forsa el 10 de febrero del 2017 Disponible en: http://www.larepublica.co/comercio-externo/m%C3%A1s-de-22-pa%C3%ADses-comprende-el-mercado-internacional-de-forsa_109956
28. Miguel Tejada, Alejandro (2011). Análisis Dinámico de estructuras en el dominio de la frecuencia.
29. Moreno Figueredo, C. (s.f.). Estado actual y desarrollo de la energía eólica en Cuba. Consultado el 13 de diciembre del 2016. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar02/HTML/Articulo01.htm>
30. Norma Cubana NC 285:2003 Carga de viento. Método de cálculo.
31. Norma Cubana NC 450:2006 Edificaciones. Factores de carga o ponderación. Combinaciones.
32. Norma Cubana NC 46:2014 Construcciones sismo resistente. Requisitos básicos para el diseño y construcción.
33. Puede albergar energía renovable en la azotea de su edificio: Consultado el 5 de febrero del 2017 Disponible en: <http://www.elmundo.es/economia/2015/06/08/55657fac268e3e4c068b456f.html>
34. Que países son líderes en la implantación de energía eólica a nivel mundial. Consultado el 20 de noviembre del 2016. Disponible en: http://assticperu.com/energia_renovable/que-paises-son-lideres-en-la-implantacion-de-energia-eolica-a-nivel-mundial.html
35. Rascacielos con aerogeneradores Consultado el 8 de febrero del 2017. Disponible en: <http://www.microsiervos.com/archivo/mundoreal/rascacielos-con-aerogeneradores.html>

ANEXOS



Anexo 1: Aerogeneradores en edificios

Fuente: Rascacielos con aerogeneradores

<http://www.microsiervos.com/archivo/mundoreal/rascacielos-con-aerogeneradores.html>



Anexo 2: Aerogeneradores integrados en luminarias.

300w vertical axis wind turbine for home use <https://spanish.alibaba.com/product-detail/300w-vertical-axis-wind-turbine-for-home-use-60193937267.html>