

**SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UN
AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA Y DISEÑO
PRELIMINAR DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE, COMO
ALTERNATIVA PARA LAS UNIDADES DE PRODUCCIÓN
AGRÍCOLA.**

**Ing. Rafael Vicente Gutiérrez¹, Ing. José Rafael Alas Hernández¹, Ing. José Ramón
Aguilera Nieves¹, M. Sc Juan Israel Veliz Alonzo², M Sc. Bárbaro Luis Peña
Rodríguez²**

*1. Universidad Politécnica Territorial del Alto Apure “Pedro
Camejo”, Antiguo Hato Modelo, Carretera Nacional Vía el
Samán*

2. Universidad de Matanzas, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba.

Resumen.

La disponibilidad de un equipo generador eólico de baja potencia en las unidades de producción agrícola no abastecidas por la red eléctrica nacional, inspira la idea del aprovechamiento de uno de los recursos naturales disponibles en el estado Apure, por lo que en este trabajo se propone como alternativa viable el uso de un aerogenerador de baja potencia, que permita energizar unidades de producción agropecuaria aisladas del sistema eléctrico nacional, este tipo de sistemas en la actualidad resulta uno de los más empleados a nivel mundial poseen un diseño relativamente simples y presentan costos de mantenimiento reducidos, La selección de las características del aerogenerador se realiza teniendo en cuenta las condiciones ambientales existentes en la localidad objeto de estudio, considerando que el potencial eólico existente no sobrepasa una media anual de 4,07 m/s.

***Palabras clave:** aerogenerador, armaduras tridimensionales, energía eólica, palas, renovable, elemento finito, rótulas,*

La Energía Renovable.

La vida, en sí, es una manifestación energética, la cual surge de alguna manera con los inicios del universo, que gracias a la presencia de elementos básicos como el Helio y el Carbono entre otros, se piensa, dio origen a sus primeras expresiones. Las formas en las que se presenta la energía es infinita, pudiendo clasificarse como renovables y no renovables, en todo caso, el ser humano ha aprendido a producir, controlar y utilizar algunos tipos de energía, a través del aprovechamiento de combustibles fósiles, que le permite disponer del tipo que se ha llamado no renovables, debido a que estas se obtienen de combustibles que van agotando su existencia a medida que se usan, por otro lado, en la actualidad, los avances tecnológicos permiten la explotación de una gama importante de energías alternativas que por la naturaleza inagotable de sus fuentes, permiten calificarlas como energías renovables, entre las que se puede citar: la energía solar, la energía geotérmica, los vientos que son una consecuencia de la energía que proporciona el sol, las corrientes marinas y de los ríos, las mareas de los mares que permiten disponer de centrales

mareomotrices, entre otras, siendo evidente que en su aprovechamiento se genera menos agentes contaminantes por ser más limpias que la proveniente de los combustibles fósiles, lo que favorece la del medio ambiente.

Según el colectivo de autores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)(2004) la necesidad del ser humano, de satisfacer su bienestar social y su confort, lo ha conllevado a controlar muchos procesos que le permitan la disponibilidad de energía, debido a su dependencia como ente biológico y social, ya sea como la radiación solar indispensable para las funciones biológicas o para los ciclos agrícolas, o como la fuerza motriz del viento o del agua requerida para impulsar molinos o equipos de generación eléctrica.

A medida (UNAM, 2004) que aumente la población, que el desarrollo económico de los países mejore y que el progreso tecnológico siga avanzando se mantendrá la necesidad de producir, controlar y utilizar procesos que le garanticen a la humanidad.

Breve reseña histórica sobre el uso de la energía eólica.

Desde el principio, la humanidad se ha visto en la necesidad de mejorar sus condiciones de vida, y en cuanto al aprovechamiento de la energía eólica, los pioneros en esta área fueron los Persas que construyeron el molino más antiguo conocido para moliendas y bombeo de agua, aunque también hay registros de que en Irak, Egipto y China, disponían de máquinas eólicas muchos siglos antes de J.C.; Hammurab I. rey de Babilonia, 17 siglos antes de J.C. utilizó molinos accionados por el viento para regar las llanuras de Mesopotamia y para la molienda del grano. Se trataba de primitivas máquinas eólicas de rotor vertical con varias palas de madera o caña, cuyo movimiento de rotación era comunicado directamente por el eje a las muelas del molino. En China hay referencias de la existencia de molinos de rotor vertical y palas a base de telas colocadas sobre un armazón de madera, que eran utilizados para el bombeo de agua, máquinas conocidas como panémonas, precursoras de los molinos persas. El egipcio Herode Alejandría representa en un estudio un molino de eje vertical de cuatro palas.

En el viejo mundo (Fernández, 1980) durante la Edad Media se comenzó a extender por algunos países como Grecia, Italia y Francia. Según algunos autores, se debe a los cruzados la introducción de la tecnología eólica en Occidente, si bien otros opinan que Europa desarrolla su propia tecnología, claramente distinta de la oriental, ya que en Europa se imponen fundamentalmente los molinos de eje horizontal, mientras que los molinos orientales eran de eje vertical.

En el siglo XVI Holanda perfecciona el diseño de los molinos y los utiliza para el drenaje; entre los años 1609 y 1612, Beemster Polder fue drenado con la ayuda de estas máquinas; sin embargo, no sólo utilizaron los molinos para drenar el agua, sino también para extraer aceites de semillas, moler grano, etc.; precisamente el nombre de molinos proviene de este tipo de aplicaciones. Una idea de la importancia que en el pasado adquirió la energía eólica nos la da el hecho de que en el siglo XVIII, los holandeses tenían instalados y en funcionamiento 20.000 molinos, que les proporcionaban una media de 20 kW cada uno, energía nada despreciable para las necesidades de aquella época.

En 1724 Leopold Jacob proyecta un molino de ocho palas que mueve una bomba de pistón; en 1883 aparece el pequeño multipala americano diseñado por Steward Perry. Este molino, de unos 3m de diámetro utilizado para bombeo, ha sido el más vendido de la historia. Como precursor de los actuales aerogeneradores, es necesario citar la aeroturbina danesa de Lacourt (1892), máquina capaz de desarrollar entre 5 y 25 kW.

Hasta ese momento, las velocidades típicas que se habían conseguido con los multipala eran de dos veces la del viento, mientras que los molinos clásicos habrían funcionado con velocidades en el extremo de la pala del mismo orden de magnitud que la del viento.

En cuanto a la energía aprovechable del viento, La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de $16/27$ (el 59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

A pesar de los esfuerzos realizados y de la mayor eficacia de las nuevas turbinas, las dificultades de almacenamiento y las desventajas propias de la irregularidad de los vientos fueron la causa de que las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento como recurso energético continuaran declinando hasta el final de la Primera Guerra.

Los combustibles fósiles, y en particular el petróleo, empezaban a imponerse como la principal e insustituible fuente de energía.

Para el periodo correspondiente a los años cincuenta y sesenta, el desarrollo de la energía eólica se ve limitado debido que su factibilidad económica no le permitía competir con los bajos precios del petróleo que se presentaban en ese entonces.

Según Manwell *et al.* (2002), el tamaño medio de las máquinas instaladas hasta 1990 estuvo en el rango de los 100 kW, aunque se observaba una clara tendencia ascendente. En los últimos años los pequeños aerogeneradores aumentaron sus potencias, a la vez que mejoraban su fiabilidad y reducen sus costos; las potencias medias de los aerogeneradores instalados entre 1990 y 1991 era de 225 kW; en los últimos años se han podido construir aerogeneradores con potencias mayores de 3 MW por la compañía Wind Energy Association, que aumentan la fiabilidad de las máquinas y reducen sus costos, convergiendo hacia una nueva generación de aeroturbinas, lo que demuestra el alto grado de madurez alcanzado por esta tecnología. En la figura 1 aparece un esquema que muestra la relación entre la altura máxima de los aerogeneradores con la potencia, el diámetro del rotor y la altura de la torre.

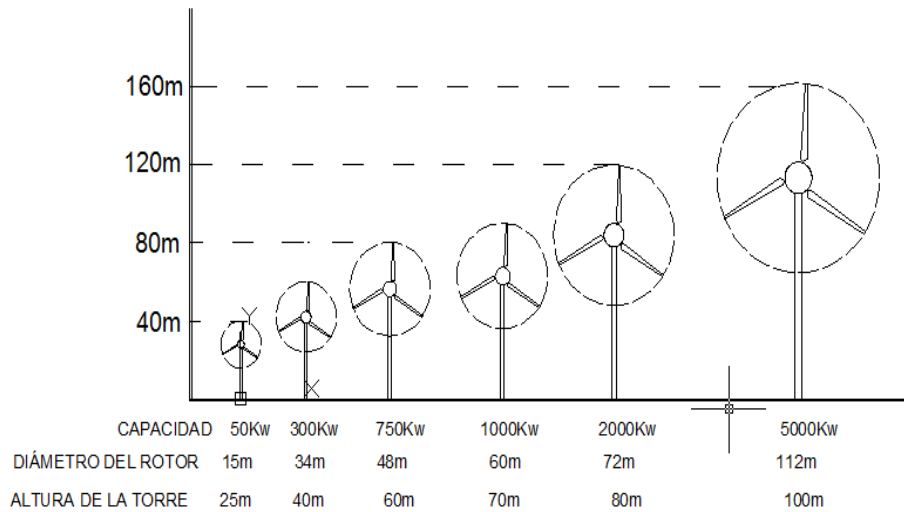


Figura: 1. Relación entre la altura máxima de los aerogeneradores con la potencia, el diámetro del rotor y la altura de la torre. Fuente: [Wind Energy].

En la primera década del siglo XXI la energía eólica fue el sector energético de más rápido crecimiento con promedio de un 29% sobre el año anterior. Con la crisis económica mundial originada en el año 2004 las energías renovables por su no dependencia de los combustibles fósiles y en especial la eólica han experimentado un salto inmenso (ver figura 2), se evidencia la evolución de la capacidad instalada.

Venezuela, aunque ha dispuesto de una diversidad importante de energía explotable, presenta zonas de difícil acceso, y por consiguiente poca penetración de las redes eléctricas, lo que genera interés en el uso de pequeñas máquinas aerogeneradoras, ya que los costos de expandir esta redes son muy altos

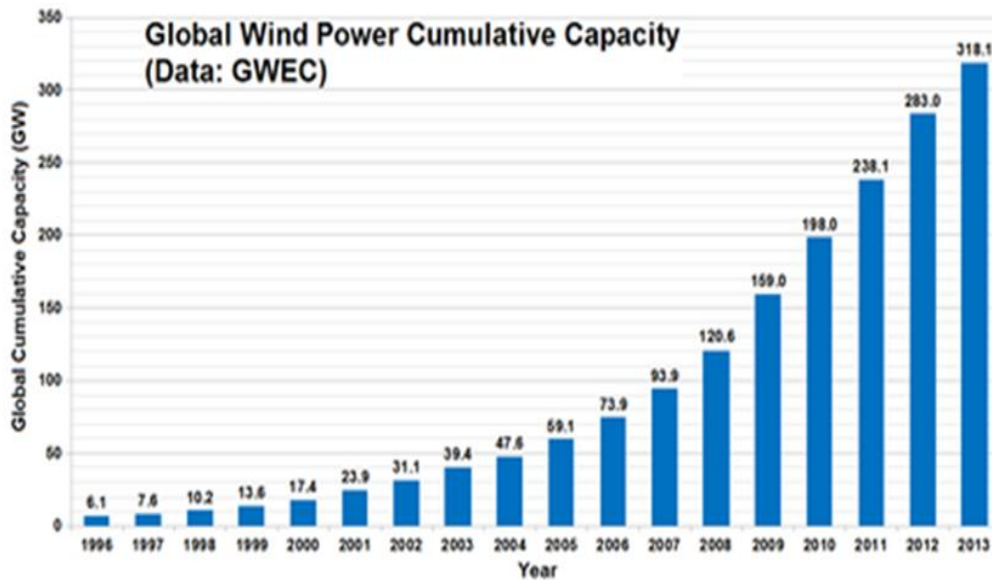


Figura 2.- Evolución de la capacidad instalada entre 1996-2013. [Internet, Energía eólica].

¿Qué está haciendo Venezuela actualmente?

En nuestro país se comienza a incursionar de manera importante, en cuanto a estudio e inversión sobre el aprovechamiento de la energía eólica a partir del año 2005 cuando PDVSA había proyectado comenzar a construir en la península falconiana un desarrollo eólico que iba a llamarse “Parque Eólico Paraguaná”(Ver Figura 3) instalado en un área de 921 hectáreas, integrado por 27 turbinas de 1,5 megavatios, los que daría a este parque una capacidad de 40 megavatios por año, a un costo de 56 millones de dólares

Según (Flórez, 2014), en la Península de Paraguaná el uso de esta fuente energética ha permitido beneficiar a 10 mil 500 viviendas y hasta la fecha se han dejado de emitir 43 mil 726 toneladas de dióxido de carbono al ambiente.



Figura 3. Parque eólico Paraguaná.

Al inicio del año 2014 técnicos de montaje mecánico y puesta en servicio, realizan pruebas para arrancar de 30 equipos más, correspondientes a la segunda fase del proyecto, los cuales aportarán 40 megavatios al SIN llegando así a totalizar 70 megavatios.

Actualmente en el parque eólico La Guajira, se ha completado la fase 1A que consiste en la instalación de 12 unidades, para luego continuar con la fase 1B que consiste de 24 unidades con la intención de generar 75.6 MW, donde el estado invirtió 230 millones de dólares para su desarrollo

Para el año 2002 el petróleo cubría el 62% de la producción de energía primaria en Venezuela, el gas natural el 16,2%, la hidroenergía el 8,7% y el carbón mineral el 2.8%. La producción de energías ecológicas, no contaminantes y sustentables era prácticamente inexistente en Venezuela. Con estas inversiones estos porcentajes se han visto modificados, apareciendo ahora la energía eólica como la más prometedora en cuanto a su crecimiento a mediano plazo.

A través de un convenio bilateral con Argentina el parque eólico La Guajira se llevará a cabo en siete fases que se estima culmine antes de 2019. Por ahora se tienen cinco aerogeneradores instalados de 12 unidades de la Fase 1A. Para la fase 1B se instalarán 24". Al terminarse la fase 1 se podrán generar 75,6 MW (megavatios) que alimentará el sistema eléctrico nacional. Para esta etapa Venezuela invirtió 230 millones de dólares para su desarrollo.

El Gobierno Nacional dictó lineamientos para el aprovechamiento de energías renovables, en el marco del Primer Plan de la Nación Simón Bolívar y ahora replanteados en el segundo, con el fin de hacer que Venezuela sea una potencia energética.

Aplicaciones de las máquinas eólicas.

La energía captada por el rotor de una máquina eólica se transforma inicialmente en energía mecánica disponible en un movimiento rotativo, Este movimiento puede utilizarse para impulsar dispositivos que la transformen en otras formas de energía: mecánica, eléctrica, térmica o potencial. Las aplicaciones más efectivas serán aquellas en las que se llega al uso final de la energía con el menor número de transformaciones.

La aplicación de las máquinas eólicas para la producción de energía eléctrica, según el servicio a prestar, admite la siguiente clasificación:

- Instalaciones aisladas o remotas.
- Sistemas híbridos diesel-eólicos.
- Sistemas interconectados a las redes de distribución de energía eléctrica.

Cada una de estas aplicaciones tiene características particulares que condicionan tanto el tipo de máquina a utilizar como sus sistemas auxiliares, en la tabla 1.1 se relaciona el objeto de trabajo de las máquinas su categoría, con el tipo de rotor y sus aplicaciones fundamentales

Instalaciones remotas o aisladas.

Según (Gaya, 2008) en la mayoría de los países, existen zonas que debido a la ubicación relativa y a las condiciones del terreno hacen que la inversión financiera para la construcción de redes de distribución eléctrica resulte extremadamente costosa, lo que conlleva al desarrollo de sistemas adaptables a cada situación que permiten la posibilidad disponer del recurso de la energía de una forma práctica.

Configuración y características de los generadores eólicos aislados.

Normalmente un sistema autónomo requiere de potencias que van de 0,15 hasta 10 kW. Se emplean rotores de eje horizontal habiendo máquinas de paso variable y de paso fijo. Se prefieren estas últimas pues presentan menos problemas de mantenimiento aunque en este caso serán necesarios dispositivos que la protejan ante vientos muy fuertes.

Las soluciones adoptadas van desde sistemas excéntricos que “desalinean” al aerogenerador de su posición enfrentada al viento a sistemas de frenado que evitan que las palas giren en condiciones adversas. En la gran mayoría de los casos se emplean generadores sincrónicos de imán permanente y la acumulación se realiza en baterías de plomo-ácido. Para alimentar equipos que requieran C.A. desde las baterías es necesario utilizar convertidores de C.C. a C.A., llamados inversores.

Se han implementado sistemas autónomos para los más variados usos: alimentación de repetidoras de TV y telefonía, faros, instalaciones domiciliarias, (Ver figura 4). En todos ellos pudo demostrarse la factibilidad técnica.

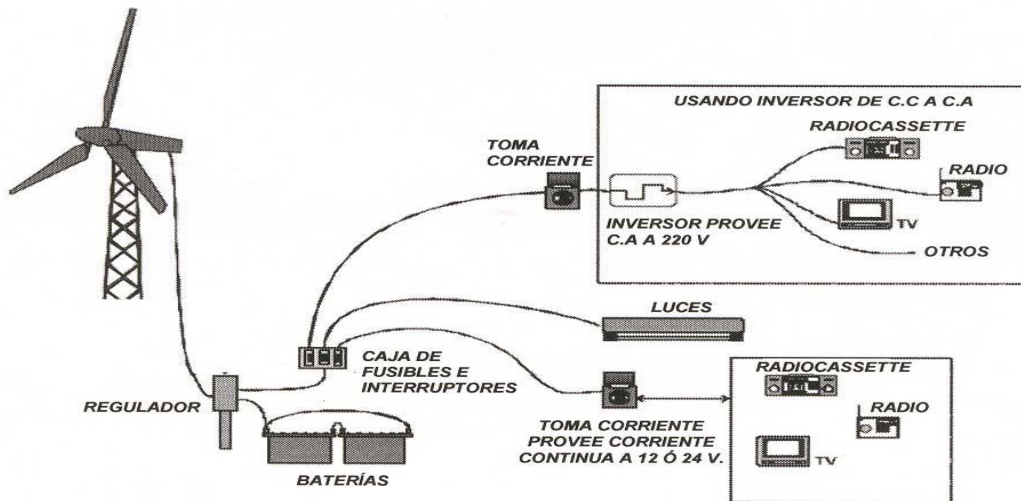


Figura 4.- Esquema típico de un sistema eólico para una unidad residencial.

Aerogeneradores pequeños.

En función a las potencialidades de las zonas en el estado Apure los sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad pueden contribuir significativamente a las necesidades de energía de las comunidades que allí residen. Un aerogenerador relativamente pequeño, es capaz de abastecer a una unidad de producción típica en la zona, pues las propiedades son del tipo residencial con cargas anexas como: cercas electrificadas, sistemas de bombeo de agua para el consumo animal, entre otros.

La zona de estudio presenta espacios lo suficientemente abiertos, sin limitación de altura, lo que da libertad para disponer de velocidades proporcionales al tamaño de la torre, que hace económicamente viable un sistema eólico pequeño que dependiendo de la demanda, se seleccionará la máquina en cuanto a tamaño y potencia, (ver figura 5).

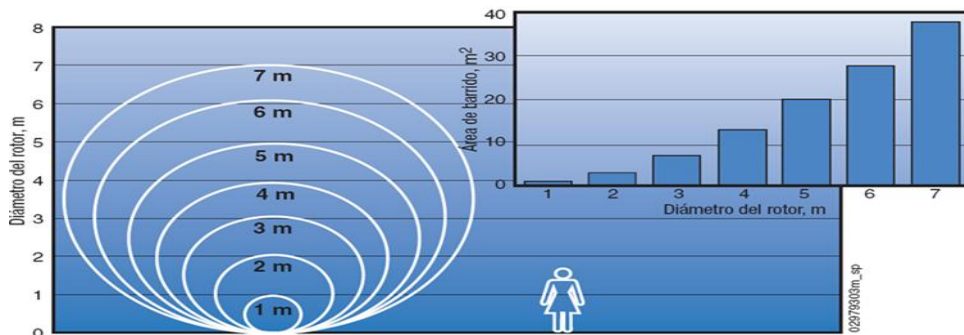


Figura 5.- Tamaño relativo de pequeñas turbinas eólicas. Fuente [Dpto. de Energía EE.UU
Sistemas eólicos pequeños]

Tipos de torres para aerogeneradores.

En la industria del aerogenerador se utilizan diferentes tipos de torres, estas son de gran importancia, ya que elevan a las máquinas a las alturas necesarias para capturar los vientos requeridos, que permitan generar la potencia deseada, las torres más frecuentes son las atirantadas con tensores, esta configuración puede combinarse con las de celosía y las tubulares.

Torres de celosía: Son las construidas con perfiles de acero unidos mediante tornillería, comparativamente son muy baratas y fáciles de construir pero necesitan de verificaciones periódicas de la correcta sujeción de sus segmentos de acero entre sí. Necesitan un emplazamiento extra para la instalación de los equipos de suelo, como los sistemas de control o equipos eléctricos, el acceso a la góndola se realiza por escalerillas exteriores de baja protección frente al viento y condiciones climáticas adversas, con alrededor de 30m de altura. No se utilizan en zonas geográficas septentrionales o para generadores de gran potencia.

Torres tubulares: Consisten en grandes torres de forma tubular o cónica de acero o de secciones de hormigón pretensado, ofrecen en su interior espacios para los equipos y para el acceso a resguardo hacia la góndola, necesitan de una instalación más laboriosa y cara, pero ofrecen una mayor resistencia y menos mantenimiento que las torres de celosía. Son las más empleadas en equipos de generación de energía.

Torres atirantadas: Normalmente usadas para rotores a sotavento, particularmente cuando la altura de la torre es muy grande comparada con el diámetro del rotor. A pesar de su relativa masa global pequeña, las torres atirantadas no presentan muy buena relación costo-eficiencia. Los tirantes y anclajes requeridos en adición aumentan el costo total, además los tirantes son considerados un obstáculo a las labores agrícolas.

A la torre atirantada se le llama también Basculante (Bornary, 2002) Este tipo de torre ofrece una serie de ventajas: bajo costo, gran efectividad y facilidad de montaje. Sus características permiten bajar el aerogenerador a nivel del suelo, minimizando riesgos de caídas con relativa facilidad y rapidez para realizar revisiones y mantenimiento. Debido a su relación altura-esfuerzos del viento en su extremo superior, la torre necesita ser sujeta por tirantes. En la figura 6. Aparecen los diferentes tipos de torres basculantes.



Figura 6.- Tipos de torres basculantes. Fuente [Guide for Design of Steel Transmission Towers, Tipos de torres para máquinas eólicas]

La torre tubular es la más utilizada debido a su simplicidad, facilidad de fabricación y bajo costo. Este tipo de torres permite incrementar su altura en un momento dado añadiendo más tramos de tubo y cambiando la distribución de los tensores.

- La torre escalonada presenta la particularidad de, además de ser abatible, permitir ser trepada hasta el aerogenerador para realizar allí revisiones periódicas sin tener que abatir la torre. Las dimensiones de los tensores y de la torre serán mayores que en el tipo de torre tubular.

- La torre de tipo celosía, ya sea triangular o rectangular, no es abatible. Es mucho más ligera que las torres auto soportadas y de menor costo, estas pueden ser usadas para soportar el peso de aerogeneradores relativamente pequeños aunque no son suficientemente fuertes para soportar el peso de equipos para grandes potencias.

Costo de servicio eléctrico.

Para determinar el costo por servicio eléctrico a considerar en este trabajo se hace referencia a la Gaceta Oficial de Venezuela N.º 37.415 de fecha 03/04/2002, que fija la tarifa del servicio eléctrico según la implementación de una serie de bandas donde la tarifa residencial se presenta en tres bloques:

TARIFA 01: Servicio residencial social, cuyas características técnicas son: corriente alterna con una frecuencia de 60 Hz, monofásica, 120 voltios, dos hilos.

Exclusivamente para el servicio permanente destinado a usos domésticos en residencias o viviendas particulares, aplicable a aquellos usuarios cuya instalación cumpla con las características técnicas definidas anteriormente, siempre y cuando su consumo no exceda el equivalente de 200 kWh mensuales durante dos meses consecutivos.

TARIFA 02: Servicio Residencial General, cuyas características técnicas son:

Corriente alterna de 60 Hz, en las tensiones secundarias normalizadas por CADAFE.

Se aplicará a los usuarios cuyo consumo no exceda el equivalente de 500 kWh mensuales durante dos meses consecutivos, en cuyo caso la tarifa aplicable será la correspondiente al Servicio Residencial Alto Consumo, Tarifa 03.

El cargo mensual será el resultante de la aplicación de los valores indicados a continuación durante la vigencia de esta Resolución, de acuerdo con el consumo.

TARIFA 03: servicio residencial alto consumo, cuyas características técnicas son: Corriente alterna de 60 Hz, en las tensiones secundarias normalizadas por CADAFE. se aplicará a los usuarios cuyo consumo exceda el equivalente a 500 kWh mensuales durante dos meses consecutivos.

Por lo tanto, al considerar que una unidad residencial presenta un consumo similar al de la tarifa 02, entonces para un tiempo de vida útil estimado en 20 años

Armaduras Espaciales.

Las armaduras espaciales o tridimensionales son estructuras mecánicas muy difundidas en la actualidad para la construcción de torres de transmisión de energía eléctrica y señales, en estructura de techos, en naves espaciales y como sostén de molinos de vientos y aerogeneradores. Como parte del presente trabajo de investigación se realizará el análisis

por elemento finito del comportamiento de los parámetros de resistencia de una armadura espacial la cual será usada en el modelo de aerogenerador tratado.

La armadura rígida básica en espacio está constituida por seis elementos unidos en sus extremos formando los lados de un tetraedro.

Elementos básicos de las armaduras espaciales.

Según la bibliografía consultada, Ambrose (2001); Das et al. (2000), de manera general las armaduras espaciales son bien adaptables a variaciones de forma, asimetría de planta o detalle y para soportar cargas especiales, poseen un forma básica, la cual es lograda a partir de la unión de al menos seis elementos tipo barras conformando una estructura tetraédrica, ahora si posteriormente se agregan tres elementos a esta configuración básica, uniéndolos a partir de tres nodos de la estructura elemental y conectándolo en un nuevo nodo se puede tener una estructura rígida más grande la cual se define como una estructura simple en el espacio, lo que evidencia la aseveración que al agregarle tres elementos al tetraedro básico, el número de nodos se incrementa en uno y se concluye que en una armadura espacial simple el número total de elementos es $m=3n-6$ donde n es el número total de nodos

Apoyos en las armaduras espaciales.

Si una armadura espacial debe tener restricción completa y si las reacciones en sus apoyos deben ser estáticamente determinadas. Los apoyos deben consistir en una combinación de bolas, rodillos y rótulas que proporcionen un total de seis reacciones desconocidas las cuales se determinan al resolver las seis ecuaciones que expresan que la armadura espacial está en equilibrio, esto en el caso de un sistema en condiciones isostáticas, ahora, en un sistema hiperestático las combinaciones de los apoyos generan una cantidad mayor de reacciones al número de ecuaciones necesarias para lograr el equilibrio.

El caso particular del presente trabajo, para el análisis estructural mediante el uso del Método de Elemento Finito empleando el software ANSYS es un sistema conformado

por una torre de celosía apoyada en su base mediante cuatro rótulas, esto por ser una estructura espacial de base cuadrada, lo que induce a un sistema con tres reacciones en cada uno de sus extremos inferiores.

Haciendo referencia sobre apoyos de la estructura espacial (Torre comunicaciones CANTV Mantecal) que es una estructura tridimensional con apoyos de empotramiento en los cuatro soportes inferiores, como se ve en la figura. 7.



Figura 7. Apoyos de una armadura espacial.

El Método de Elementos Finitos MEF.

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de la ingeniería y la física. (Liu, 2003; Felippa, 2004).

El MEF está diseñado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Se usa en el

diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema sean conocidas de antemano (Felippa, 2004).

Modelación no-lineal.

Según Felippa (2004) existen tres tipos de no linealidades: la no-linealidad del material, la no-linealidad geométrica y la no-linealidad en la aplicación de las condiciones de frontera. Estos tres tipos de no-linealidades serán abordadas a continuación:

No-linealidad del material.

La no-linealidad del material ocurre cuando la relación tensión–desplazamiento deja de ser lineal y el acero fluye convirtiéndose en plástico. Todas las estructuras reales, en la mayoría de los casos, se comportan no linealmente de una forma u otra bajo cualquier nivel de carga. En muchos casos el análisis lineal puede ser empleado, pero en otros la solución lineal puede producir resultados erróneos y es por ello que debe realizar un análisis no-lineal.

No-linealidad geométrica.

La no-linealidad geométrica está asociada a las irregularidades, que desde el punto de vista geométrico posee el modelo, como por ejemplo: los cambios bruscos de la geometría producidos por los ángulos que existen entre las líneas que forman el contorno y otros aspectos que produzcan una configuración irregular.

No-linealidad de las condiciones de frontera.

En este caso de no-linealidad juega un papel fundamental las cargas y las limitaciones de movimiento del modelo. El efecto que ejercen sobre el modelo puede estar dado por la posición, la forma de aplicación, el tipo de carga que se aplica y las magnitudes de estas.

El método de solución no-lineal Newton-Raphson.

Al presuponer una respuesta del material, post-límite de fluencia, se emplea un sistema de ecuaciones no-lineales y es requerido un método de solución iterativo, en este caso es utilizado el Método de Newton-Raphson. Antes de cada solución (en los sub-pasos) el método Newton-Raphson evalúa el vector de fuerza fuera de balance, el cual es la diferencia entre la fuerza utilizada por el programa y la carga real aplicada, y entonces realiza una solución lineal, chequeando al final la convergencia. Si este último criterio no es satisfecho, entonces el vector de fuerza fuera de balance es reevaluado, la matriz de rigidez es actualizada y una nueva solución es obtenida, el proceso de iteración continúa hasta que el problema converge o hasta alcanzar el número máximo de iteraciones.

Este método de convergencia es conocido como uno de los más rápido para solución de problemas en los que sólo se hace una evaluación de en cada iteración, y se incluye en este documento por ser utilizado por ANSYS como herramienta en la resolución de problemas no lineales.

Simulación del comportamiento de las armaduras espaciales.

El programa ANSYS es considerado un software con grandes potencialidades para la solución de problemas estructurales. Las cargas que actúan en las armaduras espaciales tienen una influencia directa en el comportamiento de las barras que componen dichas armaduras. Con el empleo de ANSYS se pueden llegar a los resultados necesarios para tener un criterio del comportamiento de la resistencia de dichos elementos. Se pueden obtener valores relacionados con, las reacciones en los apoyos, las fuerzas en cada barra, el tipo de sollicitación, las tensiones axiales, las deformaciones elásticas o plásticas y otros parámetros relacionados con la resistencia mecánica.

ANSYS características generales.

El software de simulación ANSYS sirve de soporte a la ingeniería en la que respecta a la predicción del funcionamiento y la reacción de determinado producto bajo la acción del entorno real (Structural Analysis Guide, 2009).

Según (Structural Analysis Guide, 2009) ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: pre-procesador, procesador y post-procesador. Tanto el pre-procesador como el post-procesador están previstos de una interfaz gráfica. Este procesador de elementos finitos para la solución de problemas mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no-lineales), análisis de transferencia de calor y fluido-dinámica, y también problemas de acústica y de electromagnetismo. Usualmente estas herramientas se utilizan simultáneamente logrando mezclar problemas de estructuras junto a problemas de transferencia de calor como un todo. El proceso típico de realización de un análisis aparece descrito a continuación.

1era Etapa Pre-proceso.

- Creación de geometría y mallado.
- Definición de los materiales en base a sus constantes.
- Generación de la malla, realizando una aproximación discreta del problema en base a nodos.

2da. Etapa Proceso.

- Aplicación de cargas, se aplican condiciones de borde en los nodos y elementos, se puede manejar valores de fuerzas, presión, desplazamiento, momento o rotación.
- Obtención de la solución.

3era Etapa. Post-proceso.

- Visualización de los resultados.
- Listado de los resultados.

Elemento LINK 180.

Descripción el elemento LINK180.

LINK180 es un elemento tipo barra que se puede utilizar en una variedad de aplicaciones en ingeniería. Este se puede utilizar para modelar armaduras, cables para tensión, barras, resortes, entre otras aplicaciones. En tres dimensiones este tipo de barra es un elemento que puede trabajar con fuerzas a tensión y compresión con tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones nodales de x, de y, y de z. Permite las opciones de solo tensión, solo de compresión o ambas. Como en una estructura articulada, no se considera ninguna flexión del elemento. **Datos de entrada del elemento LINK180**

La geometría, la ubicación de los nodos, y el sistema de coordenadas para este elemento se demuestran en la Figura 8. El elemento es definido por dos nodos, el área seccionada transversalmente (ÁREA), la masa por unidad de longitud (ADDMAS), y las propiedades del material. La longitud del elemento se orienta a lo largo del eje desde el nodo I hacia el nodo J.

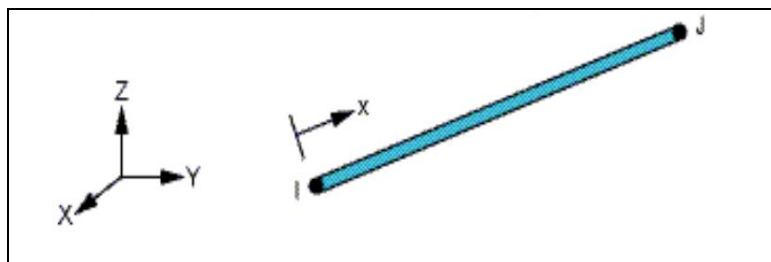


Figura 8. – Características geométricas del elemento LINK180.

El elemento LINK180 permite un cambio en área seccionada transversalmente en función del alargamiento axial. Por defecto, los cambios en el área de la sección transversal no alteran el volumen del elemento, incluso después de la deformación, se puede elegir mantener la sección transversal constante como una de las opciones del elemento.

Datos de salida del LINK180

La solución de salida asociada al elemento LINK180 se presenta en dos formas

- Los desplazamientos nodales incluidos en la solución nodal total.
- Salida adicional del elemento como se muestra en la tabla definición de salida del elemento.

Metodología empleada para el análisis de la armadura.

La metodología empleada para el análisis de la armadura se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Determinación de las reacciones en los apoyos
2. Determinación de las fuerzas en las barras y sollicitación a la que están sometidas.
3. Determinación de la tensión axial, de la deformación elástica axial y de la deformación plástica en las barras componentes de la armadura.

Ahora bien, el modelo de armadura utilizado se logró a partir de la selección de un entramado usado para el sostén de aerogeneradores. Se determinaron las dimensiones generales y las fuerzas actuantes a partir de los análisis eólicos realizados. La subdivisión se realizó de forma proporcional obteniéndose seis escalones. En la figura 9, se muestran las proporciones de la armadura, las fuerzas actuantes y las reacciones en los apoyos.

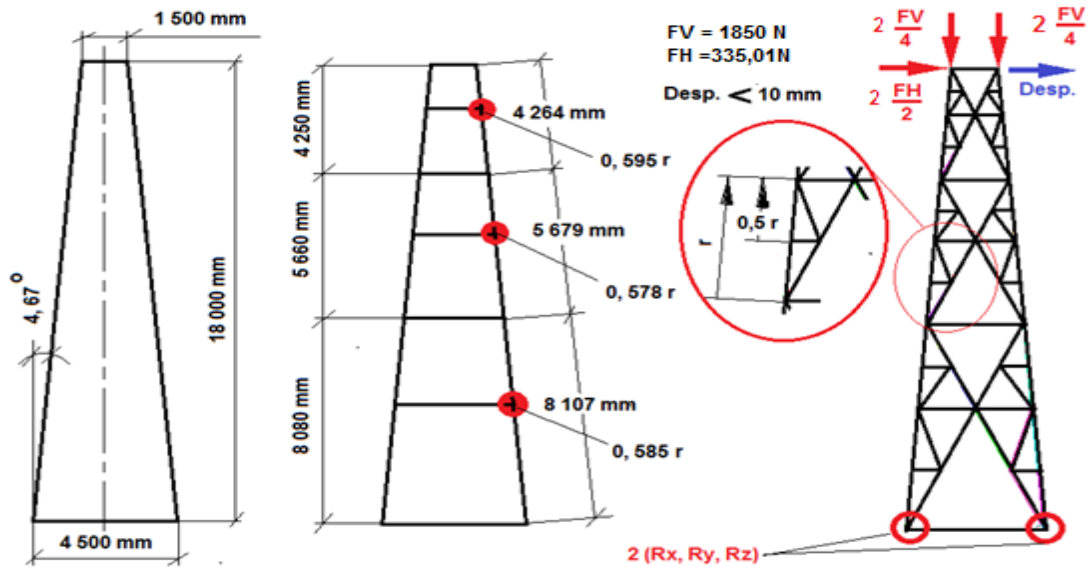


Figura 9: Proporciones de la armadura, aplicación de las fuerzas y reacciones en los apoyos.

Para la creación del modelo geométrico se tuvo en cuenta las medidas generales y particulares del modelo, la configuración del entramado, y las proporciones que permitieran lograr la generación del entramado, utilizando los comandos de ANSYS destinados a la construcción de los Key Point y las líneas. En la figura 10, a. se muestra la vista isométrica de las líneas que componen la geometría de la armadura espacial, b. vista lateral, c. vista superior.

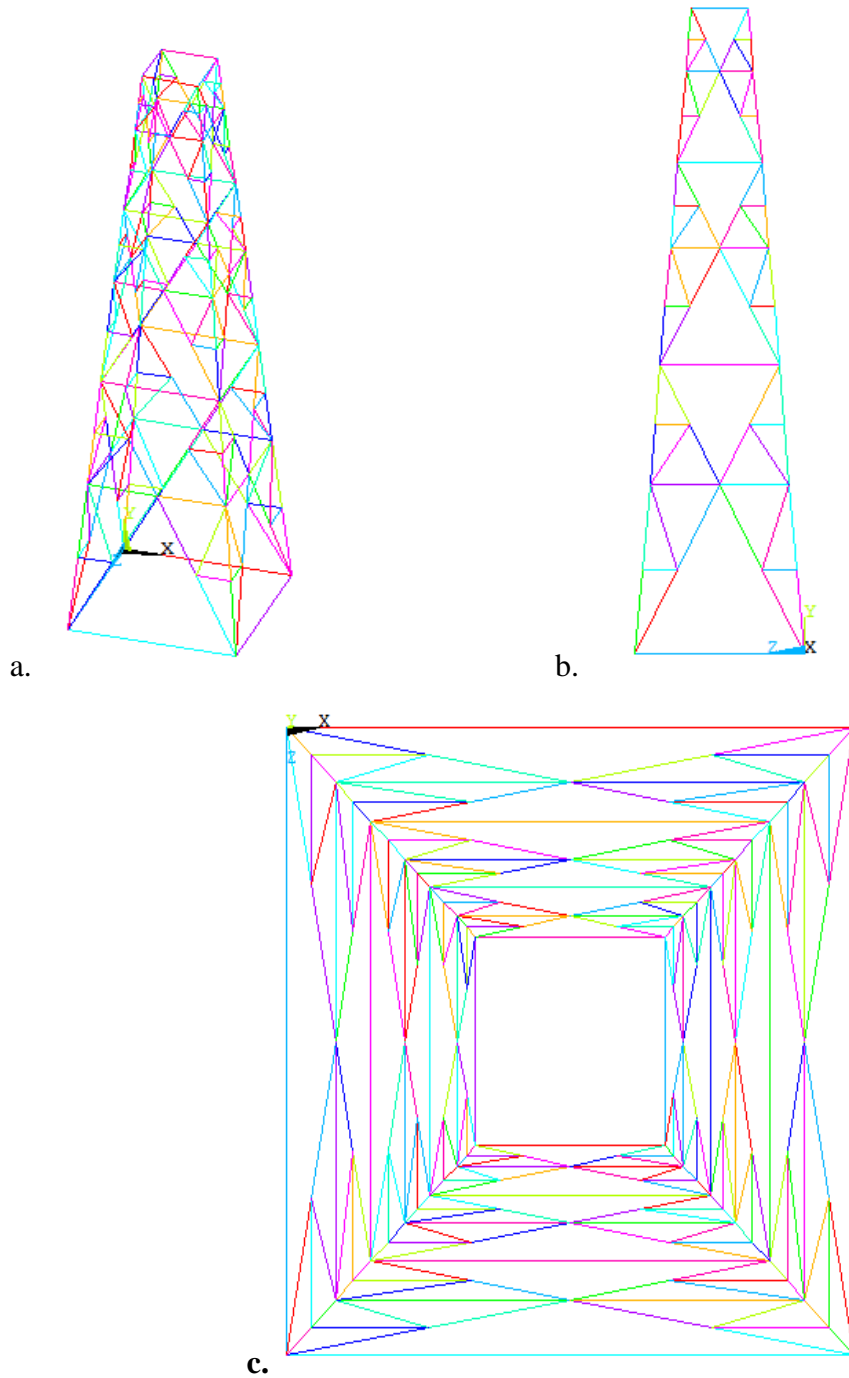


Figura 10.-Configuración geométrica de la torre, a. vista isométrica, b. vista frontal, c. vista superior.

Para definir las condiciones de fronteras se restringen los desplazamientos en los Key Points que se encuentran en la base de la armadura (Key Points 1, 2, 3, y 4) y se aplican

las fuerzas en los que se encuentran en la parte superior de la armadura (Key Points 5, 6, 7 y 8). Se restringen los desplazamientos en las direcciones x , y , z con un valor constante igual a cero. El efecto para cada punto de la armadura es similar al que provoca un apoyo tipo rótula. La fuerza que pertenece al peso del aerogenerador se sitúa verticalmente, con sentido negativo y compartidos entre los cuatro nodos de la parte superior de la armadura, el valor de esta fuerza aparece en la figura 9. Las que corresponde a la acción del viento se sitúan horizontalmente en el sentido positivo y su valor aparece en la figura 9. En la figura 11, aparece la representación gráfica del modelo con los vectores de las fuerzas y los símbolos correspondientes a las limitaciones de los desplazamientos.

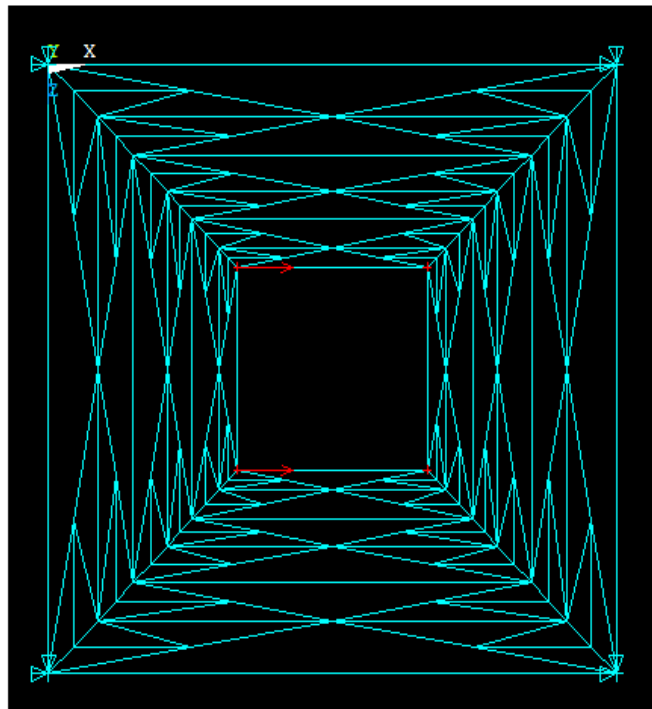


Figura 11.- Aplicación de las condiciones de frontera.

Análisis de la potencia del viento.

Durante el estudio realizado ha sido imposible establecer un conjunto de valores de velocidad del viento a pesar en la zona con dos estaciones meteorológicas, datos utilizados en el presente trabajo fueron obtenidos de Internet en la página web

<http://eosweb.lar.nasa.gov> con los valores promedios mensuales Latitud 07°33'48,6'' N, Longitud 69°08'16,1'' W. Altitud 80msnm.correspondiente a la ciudad de Mantecal, estado Apure Venezuela.

Los parámetros del viento a utilizar se obtienen los resultados mostrados en la tabla 1, sin embargo se hace necesario introducir el análisis probabilístico para el análisis de ocurrencia del viento.

Tabla 1. Resultados obtenidos del análisis de la potencia del viento.

	Ecuación empleada	Datos de entrada	Resultados obtenidos
Potencia Disponible del Viento	(2.5) P_d	$\rho = 1.2\text{Kg/m}^3$ V=4.07m/s A= 12.88m ²	$P_d=434.17\text{W}$
Potencia media disponible	(2.6) $\frac{\bar{P}_d}{A}$	$\rho = 1.2\text{Kg/m}^3$ V=4.07m/s EPE=1.91	$\frac{\bar{P}_d}{A} = 64\text{W/m}^2$
Potencia Aprovechable por una Máquina Eólica	(2.7) P_a	$P_d=434.17\text{W}$ Cp= 0.40	$P_a= 173.668\text{W}$
Potencia Media Aprovechable	(2.8) $\frac{\bar{P}_a}{A}$	$\rho = 1.2\text{Kg/m}^3$ V=4.07m/s Cp= 0.50	$\frac{\bar{P}_a}{A} = 217.08\text{W}$
Recalculo de la Potencia Aprovechable	(2.15) $\frac{\bar{P}_a}{A}$	$\rho = 1.2\text{Kg/m}^3$ V=4.07m/s EPE= 1.91	$\frac{\bar{P}_a}{A} =414.64\text{W}$

Equipo eólico seleccionado.

El equipo seleccionado obedece a los valores de los recursos naturales disponibles y a la demanda diversificada requerida por el tipo de unidad de producción a abastecer, por lo tanto, se seleccionó un equipo con un área de barrido de rotor de 12.88m² con una velocidad de arranque de 3 m/s y una masa de 185kg lo que permite la generación de energía suficiente para cubrir la necesidad promedio de estas unidades de producción que se especifica en las tablas 2 y 3.

Tabla 2.- Demanda diversificada para 40 unidades de producción.

TIPO DE ARTEFACTO	% A UTILIZAR	N° DE ARTF.	DEMANDA DIVERSIF.	FVH.	DEMANDA (KW)
LUZ Y MISCELANEOS	100	40	0.534	1.00	21.36
REFRIGERACIÓN	100	40	0.048	0.95	1.82
LAVADORA DE ROPA	40	16	1.505	0.26	6,26
COCINA ELÉCTRICA	20	8	0.750	0.40	2.4
HIDRONEUMÁTICO	20	8	0.316	1.00	2.52
DEMANDA TOTAL KW					34.36

Demanda unificada por unidad de producción = 34.36/40 = 0.86 KW. Asumiendo un factor de potencia de 0.95 resulta un demanda por vivienda igual a 0.91 KVA.

Tabla 3.- Demanda total diversificada por el sector y por una unidad de producción.

TOTAL DEMANDA DEL SECTOR	81.63 KVA.
TOTAL DEMANDA UNIFICADA/VIVIENDA	2.04 KVA

Valores de las reacciones en los apoyos.

Los valores de las reacciones en los apoyos son de gran importancia para tomar decisiones sobre las propiedades mecánicas que debe poseer la cimentación de una armadura, desde el punto de vista estático estos valores completan el sistema de fuerzas externas que actúan sobre el sólido deformable. En la tabla 4 aparecen los valores de las reacciones en los Key Points 1, 2, 3, y 4 donde se encuentran los apoyos de la armadura.

Tabla 4: Valores de las reacciones en los apoyos.

NODE	FX	FY	FZ
39	25.9	-229.01	72.536
41	-204.53	1154.0	-244.78
42	-171.98	1111.0	233.65
44	15.599	-186.03	-61.407

Descripción de las fuerzas y sollicitación a la que están sometidas las barras.

Las barras según la posición que ocupan en el entramado y la acción de las fuerzas externas que actúan sobre la armadura, pueden estar sometidas a tracción o a compresión, en otras barras de las armaduras las fuerzas se anulan y sus valores pueden ser cero. En la figura 12, se muestra un esquema de la correspondencia existente entre las componentes de las fuerzas que actúan sobre una barra y el tipo de sollicitación, este esquema se realiza a partir de la selección del elemento (E), el elemento se encuentra interconectado con los nodos (i) y (j). Si las resultantes de las componentes F_x , F_y , F_z de las fuerzas entra a la barra, ésta estará sometida a compresión y si la resultante de F_x , F_y , F_z sale de la barra, estará sometida a tracción.

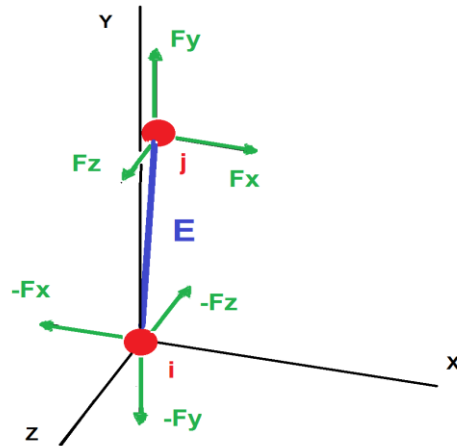


Figura 12. Representación del elemento, nodos y componentes de las fuerzas.

La localización de las posiciones de los nodos, así como sus numeraciones se obtienen por la representación que ANSYS brinda en pantalla, figura 13. La numeración de los nodos es obtenida también en la representación gráfica. La lista que brinda ANSYS figura 14. Permiten saber los valores de las componentes de las fuerzas en los nodos, también en esta lista aparecen la numeración de los nodos y la numeración de los elementos. Con la numeración de los nodos y la del elemento interconectado, obtenidos mediante la lista de ANSYS, se puede lograr identificar en el entramado, figura 13. cuál es la posición de la barra que se desea analizar. Realizando este procedimiento se puede tener una idea del comportamiento de las barras que componen la armadura espacial.

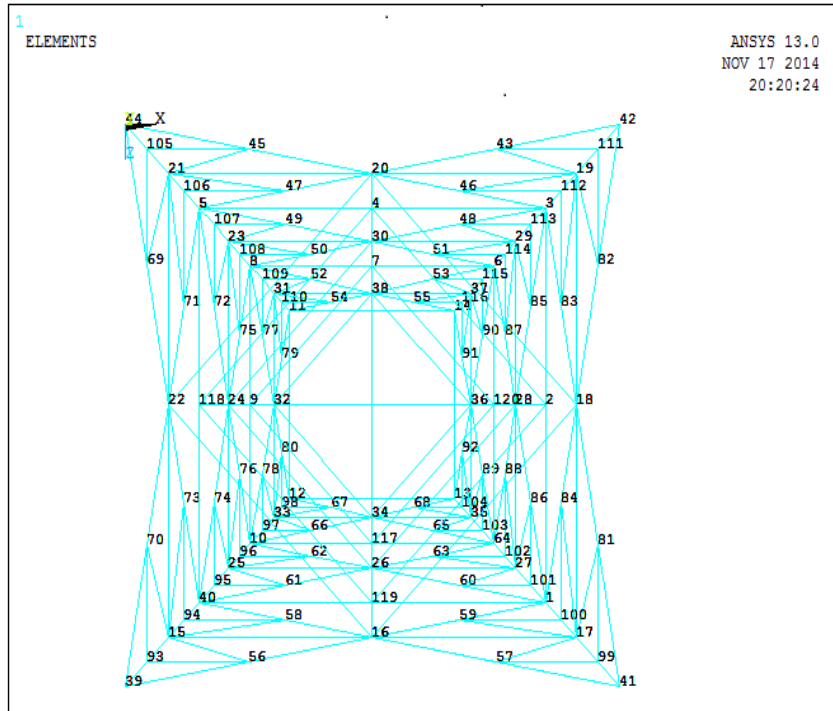


Figura 13. Distribución geométrica de los nodos.

ELEM 142	FX	FY	FZ
NODO 95	4.5168	54.201	-4.5168
NODO 25	-4.5168	-54.201	4.5168

Figura 14. Ejemplo valores de fuerzas nodales

Las barras cargadas a tracción son las que más responsabilidad poseen en la resistencia de la armadura. Los valores más elevados se encuentran en las barras que coinciden con los elementos (85, 114, 149, 173) estas se encuentran sometidas a tracción. Otras barras poseen valores significativos a compresión estas corresponden con los elementos (98, 137, 161) los cuales se encuentran situados en las barras que conforman las aristas de la base de la armadura

Se puede apreciar que las fuerzas más significativas se encuentran en las aristas de la armadura y estas alcanzan valores mayores mientras más próximas se encuentren de la base. El grupo de barras con direcciones horizontales poseen valores poco significativos, y las barras secundarias del entramado aunque poseen valores significativos estos son menores en proporción con respecto a los que se encuentran en las aristas, pero se repite el comportamiento en función de la altura a que se encuentran de la base, siendo más intensas en la zona próxima a esta. Estos resultados corroboran que debe existir una variación de las dimensiones del perfil en función de la altura y de la posición en que se encuentren las barras.

Bibliografía

1. Colectivo de autores de la UNAM. Nuevas Energías renovables una alternativa energética sustentable para México. Mexico, 2004. [UNAM].
2. Creus solé, Antonio. Aerogeneradores. SI: CYSA. Ecuador. 2008.
3. Fernández Diez, P. *Energía Eólica*. Cantabria, España: Universidad de Cantabria, 1980. [Universidad de CANTABRIA].
4. Felippa, C. A., 2004. Introduction to Finite Element Methods. University of Colorado Boulder, USA.
5. Santamarta Flórez, J, 2014, Eólica en Venezuela Disponible en Internet: <http://www.evwind.com/2014/08/22/llegan-aerogeneradores-de-gamesa-para-parque-eolico-paraguana/>. [Citado: 22/Agosto/2014].
6. Gaya, A M. Energía eólica, aerogeneradores. Tesis de maestría, [pdf] s.l. Universidad de Sevilla, 2008. [Gaya]
7. Liu, Y., 2003. Lecture Notes: Introduction to the Finite Element Method. University of Cincinnati. USA.
8. Manwell, j. f.; Mc Gowan, J. G.; Rogers, A. L. "Wind Energy Explained. Theory Design and Application". *University of Massachusetts, Amherst, USA*. JOHN WILEY & SONS, LTD. 2002. [Wind Energy]
9. Structural Analysis Guide, 2009. Disponible en: www.ansys.com

10. US Department of Energy (1980), SERI Second Wind Energy Innovative Systems Conference Proceedings, Solar Energy Research Institute (SERI).