

Recibido 29 de octubre 2021. Aceptado 01 de diciembre 2021. Publicado 23 de diciembre 2021.

ISSN: 2448-7775

Análisis del recurso eólico y potencial energético de Mazatlán, Sinaloa.

JEAN CARLO VELARDE MEZA, KARLA ALELY PERAZA REGALADO, ALDER DEL ANGEL SOTO, EBER ENRIQUE OROZCO GUILLÉN, NÉSTOR DANIEL GALÁN HERNÁNDEZ*.

Ing. en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

*Autor de correspondencia: ngalan@upsin.edu.mx

RESUMEN Los análisis y estudios del recurso eólico y potencial energético son vitales para el desarrollo de un proyecto eólico, estos nos aportan la información precisa y necesaria para determinar si es conveniente o no realizar dicho proyecto. El objetivo de este artículo es analizar una base de datos de cinco años de medición de velocidad de viento con el apoyo del software Matlab y GNU Octave, se realizan diversos estudios estadísticos para determinar el comportamiento del viento en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa durante el periodo de 2015 a 2019. Este artículo propone un estudio del recurso eólico, así como el potencial energético de este recurso con un aerogenerador Vestas V112-3.3.

PALABRAS CLAVE— Estudio de parámetros estadísticos, producción energética de un aerogenerador, recurso eólico.

I. INTRODUCCIÓN

En un mundo donde las energías convencionales predominan en la matriz de producción energética, generando gases de efecto invernadero derivados de la quema de combustibles fósiles como petróleo, carbón mineral y gas natural, es nuestro deber optar por una alternativa más limpia, como lo son las energías renovables. La energía eólica es una de las tantas opciones que tenemos para producir energía eléctrica de manera limpia, siendo ésta una de las que ha tenido mayor avance e investigación a lo largo de las últimas décadas. En los últimos años, este tipo de energía limpia ha sido un factor importante en la promoción del uso de energías renovables, abriendo paso a una transición energética tanto en México como en el mundo [1]. En Mazatlán se cuenta con la termoeléctrica José Aceves Pozos, la cual suministra energía eléctrica a gran parte del puerto y sus alrededores, si bien, la energía generada es una cantidad considerable, no se produce de una forma limpia debido al uso de combustóleo como fuente para el funcionamiento de esta central termoeléctrica. La gran desventaja que tiene el combustóleo es el hecho de ser una sustancia excesivamente contaminante, aunado a esto, actualmente México está obligado a bajar sus emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030 [2].

Tomando en cuenta lo anterior, la idea de implementar parques eólicos no es algo irracional, en realidad, implementar centrales de energía eólica podría ayudar a esta obligación que tenemos como nación con la preservación del medio ambiente. Para determinar si la instalación de un parque eólico es factible, se debe primero realizar un estudio del recurso eólico en Mazatlán.

Para este artículo se contempla la medición de las velocidades del viento de 2015 a 2019. En el caso particular

de estos estudios, se usan los datos obtenidos por la estación meteorológica de la UNAM localizada en Mazatlán [3]. Los datos que nos aporta la UNAM y la NASA, recopilados a 20 y a 10 mSNPT (metros Sobre el Nivel de Piso Terminado), respectivamente, son contrastados entre ellos [4]. Se utiliza un aerogenerador Vestas V112-3.3 como referencia tanto para la altura a la que se extrapolan los datos de velocidad de viento, la cual es de 140 mSNPT, como para un estudio de producción de energía [5].

Los primeros estudios son relacionados al cálculo de los datos estadísticos de las velocidades y direcciones de viento a lo largo del tiempo, estos se grafican y analizan para conocer su comportamiento; en ellos se hace uso del promedio, desviación estándar, intensidad de turbulencia y rosa de los vientos. En los estudios posteriores se realizan distribuciones de frecuencia, las cuales determinan el número de repeticiones de las velocidades de viento en cierto intervalo; a partir de esto, se presenta una distribución de Weibull, así como la energía y potencia producida por el aerogenerador en cada intervalo.

II. DESARROLLO

La energía contenida en el viento es inagotable debido a su carácter cíclico. Para obtener el máximo aprovechamiento energético del viento es de vital importancia realizar una correcta evaluación y caracterización del mismo.

La medición del viento se realiza cada minuto, de estas mediciones se obtiene un promedio de intervalos de una hora (promedios horarios), los cuales constituyen el conjunto de datos crudos que se procesan estadísticamente para conocer el potencial energético del viento en la localidad.

A. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Los parámetros de concentración más utilizados en el tratamiento estadístico de la velocidad del viento es la media aritmética, Ec. (1), y la moda [6].

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \cdot (\sum_{i=1}^N v_i) \quad (1)$$

La desviación estándar, Ec. (2), nos informa qué tan dispersos están los datos con respecto a la media [6].

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2} \quad (2)$$

La intensidad de turbulencia, Ec. (3), es una medida que representa la importancia de la velocidad fluctuando con respecto a la velocidad promedio [6].

$$I_t = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (3)$$

De las representaciones gráficas más usadas está la rosa de los vientos, Fig. 1, se trata de un diagrama polar en el que se representan las distintas direcciones predominantes de la velocidad del viento en los años de estudio [7].

B. ESTUDIOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA

La frecuencia de la clase, Ec. (4), es un conjunto de valores que se presentan en un intervalo de clase, se representa por n_i y N es el conjunto total de datos. El intervalo de la clase, conocido como bin, representa el límite superior e inferior de la clase, y la marca o centro de la clase, expresa el valor intermedio de la clase [6].

$$\sum_{i=1}^k n_i = N \quad (4)$$

La frecuencia relativa, Ec. (5), permite esbozar la función de distribución continua de probabilidad, este valor es adimensional [6].

$$f_r = \frac{n_i}{N} \quad (5)$$



Fig. 1. Representación de una rosa de los vientos [7].

La frecuencia acumulada menor o igual que, Ec. (6), se calcula mediante la sumatoria de todas las frecuencias relativas f_r hasta llegar al 100% de los datos [6].

$$F_i^{\leq} = \sum_{i=1}^k f_{r_i} \quad (6)$$

La frecuencia acumulada mayor que, Ec. (7), es una resta que parte desde un valor inicial 1 menos la primera frecuencia relativa acumulada menor o igual que [6].

$$F_i^{>} = \sum_{i=1}^k (1 - F_i^{\leq}) \quad (7)$$

C. EXTRAPOLACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

La ley de Hellman, Ec. (8), nos dice que la velocidad del viento varía exponencialmente en relación con la altura sobre el suelo, es decir que, si se conoce la velocidad de viento a una altura determinada, es posible calcular las velocidades en otras alturas cualesquiera. Toma en cuenta el coeficiente α que depende de la longitud de rugosidad Z_0 del terreno, en terrenos clase A tiene el valor de 1/7. Esta ley se usa principalmente en estudios de variación de velocidad del viento en periodos de largo plazo [6].

$$\frac{\bar{v}}{v_r} = \left(\frac{h}{h_r}\right)^{\alpha} \quad (8)$$

D. ESTUDIO ENERGÉTICO DEL VIENTO

La potencia eólica disponible, Ec. (9), en determinada región es directamente proporcional al área que se está considerando, es por esto que, si se duplica el diámetro del rotor del aerogenerador, la energía obtenida se verá multiplicada por un factor igual a cuatro [8].

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \quad (9)$$

La densidad de potencia eólica, Ec. (10), se define como la potencia media del viento por unidad de superficie para un determinado periodo de tiempo [8].

$$P_{wd} = \frac{P_w}{A} = \frac{1}{2} \rho v_w^3 \quad (10)$$

La Función de Densidad de Probabilidad (FDP) de Weibull, Ec. (11), describe la variación de viento en un emplazamiento típico. Esta ley nos permite estimar el potencial energético y la energía anual que puede producir un aerogenerador. Está en función del factor de forma k , es adimensional, y caracteriza la asimetría o sesgo de la función $p(v)$, c es el factor de escala, con unidades en m/s, es el valor próximo a la velocidad media anual [8].

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k} \quad (11)$$

El estudio de producción de energía eléctrica se realiza con un aerogenerador de la marca Vestas, con datos mostrados en la Tabla I [5].

TABLA I. AEROGENERADOR VESTAS DE 3.3 MW.

| Aerogenerador V112-3.3 | |
|------------------------------|----------------------|
| Potencia nominal | 3.3 MW |
| Velocidad nominal del viento | 13 m/s |
| Diámetro de la turbina | 112 m |
| Área de barrido | 9,852 m ² |
| Altura de buje | 140 m |



El aerogenerador tiene una curva característica proporcionada por el fabricante, Fig. 2, que relaciona la Potencia Eléctrica y el Coeficiente de Potencia (C_p) vs la velocidad del viento [5].

De la curva se puede obtener la producción de potencia en base a la velocidad del viento, datos que permiten calcular la energía eléctrica entregada por el aerogenerador con la velocidad de viento horaria promedio de Mazatlán.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se describen las características que deberán aplicarse a las figuras, tablas y ecuaciones.

Los resultados que se muestran en esta sección se obtienen a partir de los estudios realizados a los datos de la velocidad del viento a 20 mSNPT, los cuales son recopilados de la red universitaria de observatorios atmosféricos de la UNAM estación MZT, con las velocidades promedio horarias en los años 2015 a 2019 mostradas en la Fig. 3.

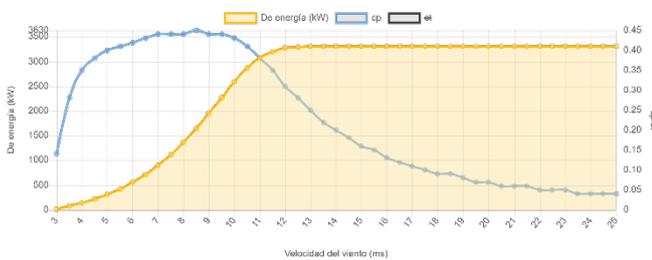


Fig. 2. Curvas características del aerogenerador [5].

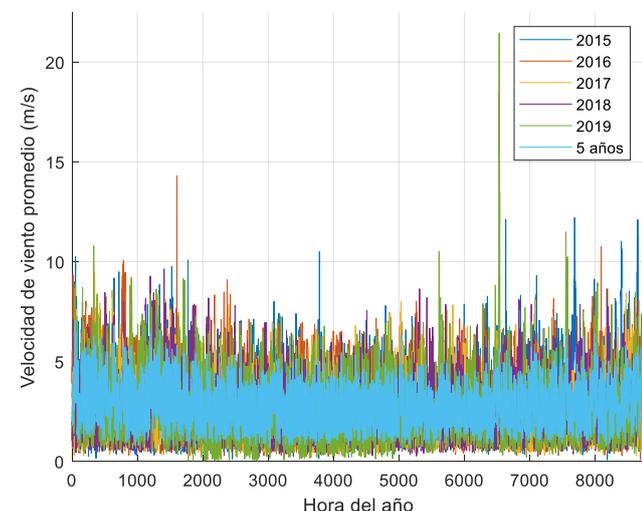


Fig. 3. Velocidad de viento promedio horaria a 20 mSNPT.

A. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VELOCIDAD DE VIENTO A 140 MSNPT

El comportamiento de la velocidad del viento mensual promedio a la altura de 20 mSNPT del año 2015 a 2019 se observa en la Fig. 4. El mes donde se presenta el pico máximo promedio de velocidad de viento es en febrero de 2018 y 2019. El mes de junio de 2019 es el mes en el que el promedio de la velocidad del viento es mínimo, con magnitud de 2.325 m/s.

Para conocer el comportamiento de la velocidad del viento a una altura que pueda ser transformada su energía cinética en energía eléctrica por un sistema conversor de energía eólica, se toma de referencia la altura del buje a 140 mSNPT del aerogenerador V112-3.3 mostrado en la Tabla I; extrapolando las velocidades promedio horarias de la altura de medición por medio de la ley de Hellman a la altura del buje.

En la Fig. 5, se muestra una comparación de las velocidades de viento promedio horarias a 20 mSNPT vs 140 mSNPT, donde se aprecia el incremento del perfil vertical del viento con la altura.

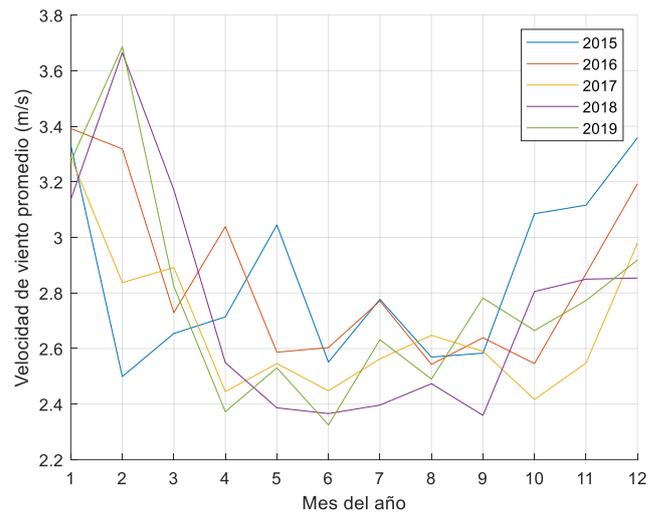


Fig. 4. Velocidad de viento promedio mensual por año a 20 mSNPT.

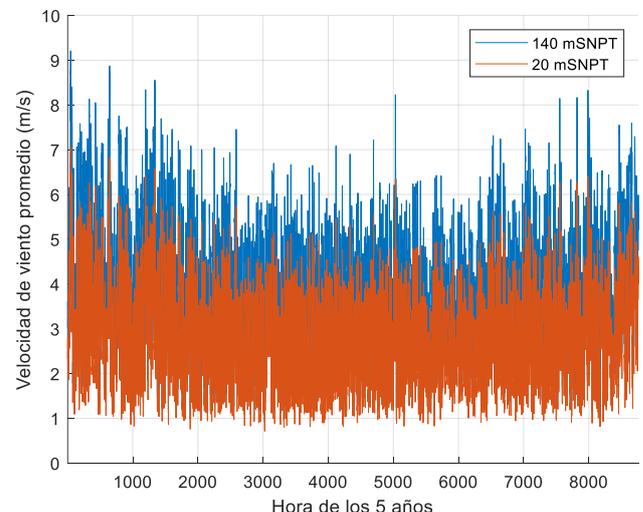


Fig. 5. Comparación de velocidades de viento promedio horarias a 20 mSNPT y a 140 mSNPT.

El comportamiento de las desviaciones estándar de las velocidades de viento a lo largo de cada año desde 2015 hasta 2019 de forma mensual y total a 140 mSNPT se muestra en la Fig. 6, donde se observa que el mes con desviación estándar máxima es febrero de 2018, con magnitud de 2.193 m/s. Por el contrario, mayo de 2017 es el mes en el que la desviación estándar es mínima, con magnitud de 1.316 m/s.

El comportamiento de las intensidades de turbulencia de viento promedio a lo largo de cada año desde 2015 hasta 2019 de forma mensual y total a 140 mSNPT, se muestra en la Fig. 7, donde se observa que el mes mayor intensidad turbulenta es septiembre de 2019, con magnitud de 0.7498. Por el contrario, agosto de 2015 es el mes con la mínima intensidad de turbulencia de 0.5256.

Las tendencias de las direcciones de las velocidades del viento, Fig. 8, donde se observa los vientos útiles en rojo, los cuales se presentaron en un rango de $2 \text{ m/s} \leq V \leq 10 \text{ m/s}$, considerando los vientos en calma entre $0 \text{ m/s} \leq V < 2 \text{ m/s}$. La dirección de viento útil que más se repite es en dirección 315° , considerando el Norte como la referencia. Por otra parte, las direcciones de viento que menos se repiten son a 82° , 87° y 149° .

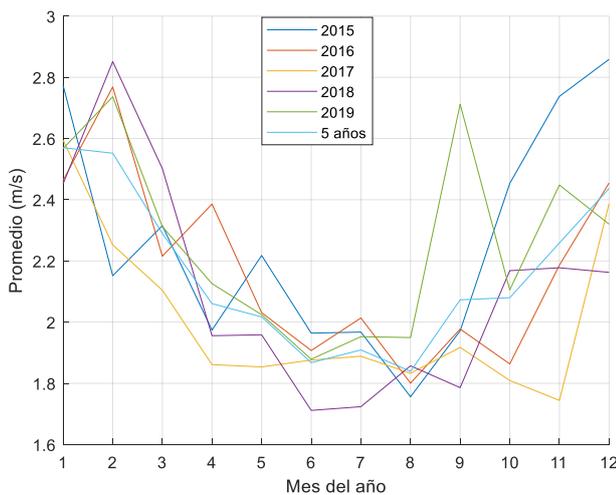


Fig. 6. Desviación estándar de las velocidades de viento promedio a 140 mSNPT.

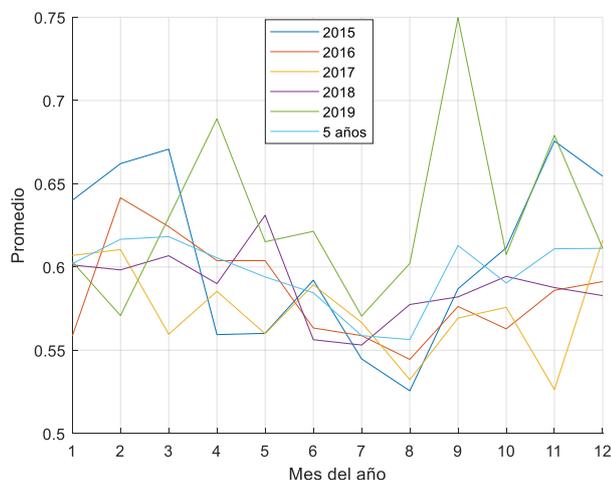


Fig. 7. Intensidad de turbulencia de las velocidades de viento promedio a 140 mSNPT.

B. DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA

Los datos de las distribuciones de frecuencia de la velocidad del viento son mostrados en la Tabla II. Estos datos muestran las velocidades que más se repiten en cada intervalo de la clase, estos datos son utilizados posteriormente para un estudio de producción de energía. El histograma de frecuencias relativas, Fig. 9, muestra la cantidad de horas que inciden en cada intervalo de velocidad. En el histograma se observa que la moda anual de la velocidad de viento está en el intervalo de 2-3 m/s, en base al dato de la Tabla II.

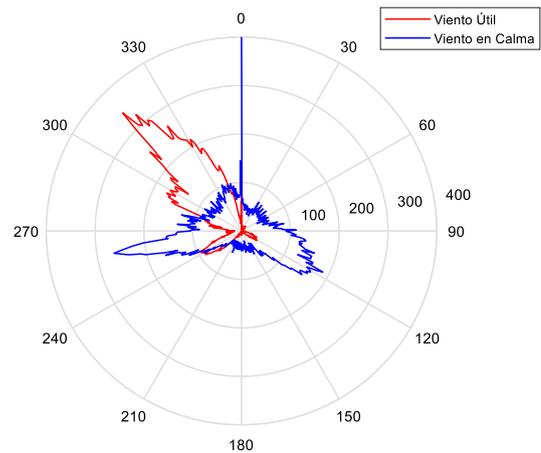


Fig. 8. Rosa de los vientos de las direcciones de viento útil promedio anual.

TABLA II. DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA.

| Intervalo de la clase (m/s) | Frecuencia de la clase | Frecuencia relativa | Frecuencia relativa acumulada " \leq " | Frecuencia relativa acumulada " $>$ " |
|-----------------------------|------------------------|---------------------|--|---------------------------------------|
| | ni (horas) | fr = ni/N | Fam | FaM = 1-fr |
| $0 \leq V \leq 1$ | 2 | 0.00023 | 0.00023 | 0.999773 |
| $1 < V \leq 2$ | 1195 | 0.13642 | 0.136642 | 0.863356 |
| $2 < V \leq 3$ | 2349 | 0.26815 | 0.404795 | 0.595205 |
| $3 < V \leq 4$ | 1907 | 0.217694 | 0.622488 | 0.377511 |
| $4 < V \leq 5$ | 1630 | 0.186073 | 0.808562 | 0.191438 |
| $5 < V \leq 6$ | 1079 | 0.123174 | 0.931735 | 0.068265 |
| $6 < V \leq 7$ | 429 | 0.048973 | 0.980708 | 0.019292 |
| $7 < V \leq 8$ | 142 | 0.016210 | 0.996918 | 0.003082 |
| $8 < V \leq 9$ | 26 | 0.003000 | 0.999886 | 0.000115 |
| $9 < V \leq 10$ | 1 | 0.000114 | 1 | 0 |
| Total | 8760 | 1 | | |

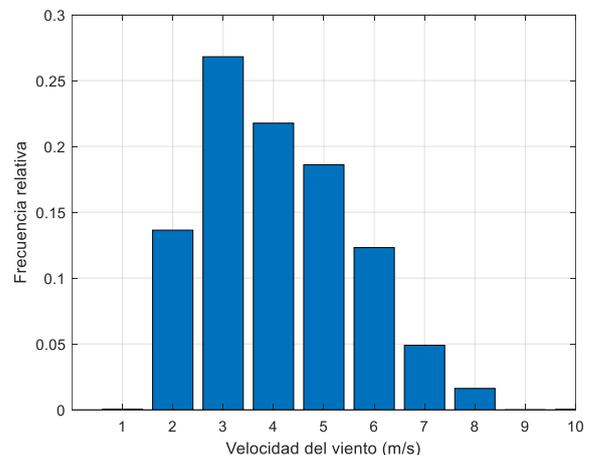


Fig. 9. Histograma de frecuencias relativas.

Analizando este punto, la velocidad no es favorable para la generación de electricidad teniendo en cuenta la velocidad de entrada del aerogenerador propuesto, ya que la moda de estas velocidades es a 3 m/s, velocidad de arranque del aerogenerador en estudio.

La curva de la frecuencia relativa acumulada menor que, Fig. 10, muestra que cerca del 60% de las velocidades registradas en este estudio está por debajo de la velocidad de viento de 4 m/s.

La curva de frecuencia relativa acumulada mayor que, Fig. 11, muestra que el 20% de las velocidades promedio horarias de viento superan los 5 m/s.

C. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL

Los resultados energéticos del viento se representan por la distribución de Weibull, Fig. 12, en la cual se observa la moda de las velocidades del viento en estudio, siendo la velocidad de viento más probable de 2.13 m/s aproximadamente.

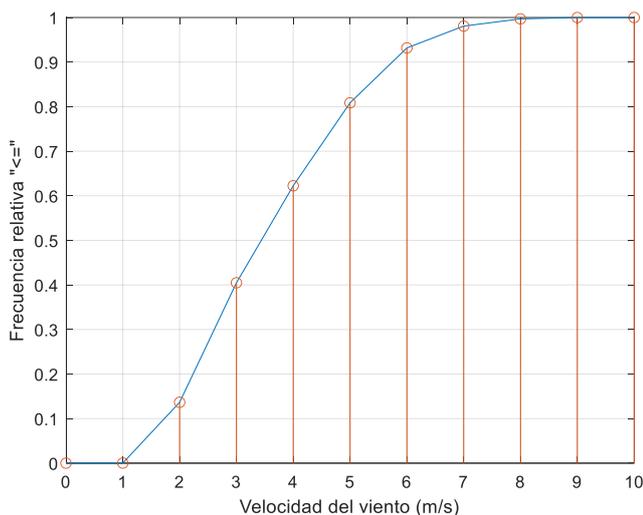


Fig. 10. Frecuencia relativa acumulada menor o igual que.

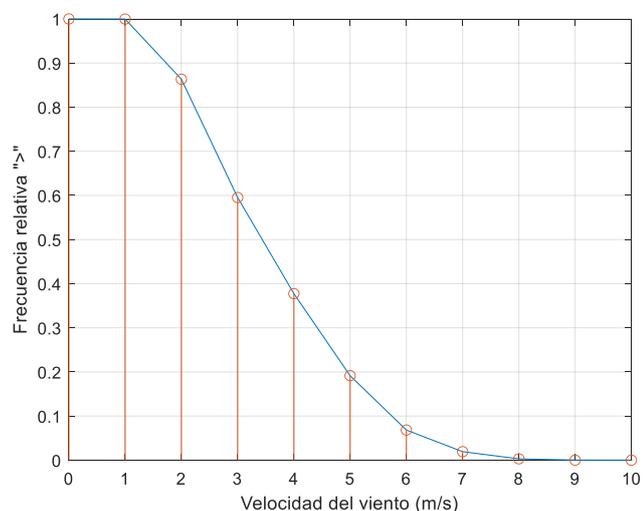


Fig. 11. Frecuencia relativa acumulada mayor que.

D. COMPARACIÓN DE DATOS ENTRE BASE DE NASA – UNAM

La comparación de los promedios obtenidos de las bases de datos de NASA – UNAM durante el periodo de 2015 a 2019, de manera mensual y anual (total de los 5 años), se muestra en la Fig. 13, con las velocidades de viento extrapoladas a 140 mSNPT.

Se obtiene de la Fig. 13, que la velocidad de viento promedio de la NASA es de 4.05 m/s, contra el promedio total de los datos de la UNAM que es de 3.619 m/s. En la mayoría de las comparaciones, las funciones que representan los datos de la base de NASA contienen valores de velocidad de viento promedio más elevados en comparación a los datos obtenidos por medición en la estación de la UNAM.

E. POTENCIA EÓLICA DISPONIBLE Y CANTIDAD DE ENERGÍA GENERADA

Tomando de referencia la curva de potencia del aerogenerador vs velocidad de viento, Fig. 2, y las horas promedio anuales (frecuencia de la clase) en que se presenta esa velocidad, se genera la Tabla III, para la estimación de la Energía que podría entregar el aerogenerador de referencia descrito en la Tabla I.

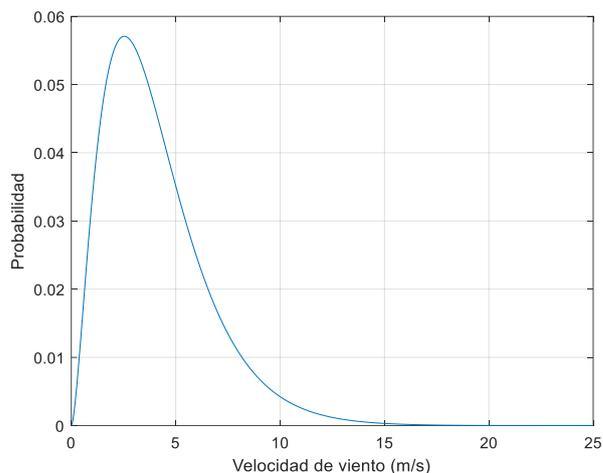


Fig. 12. Función de distribución de probabilidad de Weibull.

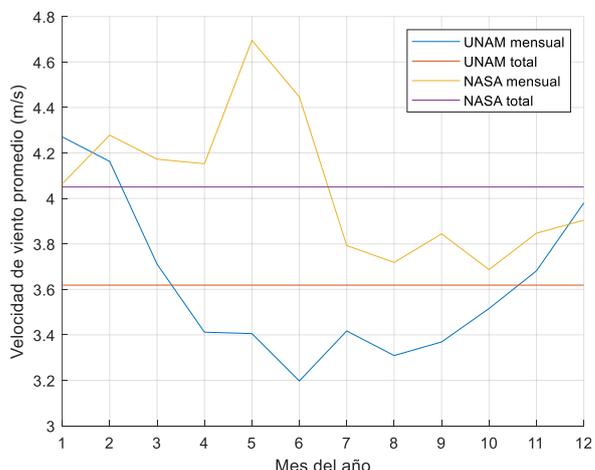


Fig. 13. Comparación de datos entre la base de datos NASA – UNAM.

TABLA III. ENERGÍA Y POTENCIA PRODUCIDA POR EL AEROGENERADOR.

| Intervalo de la clase (m/s) | Frecuencia de la clase (horas) | Potencia (kW) | Energía generada (MWh) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| $0 \leq V \leq 1$ | 2 | 0 | 0 |
| $1 < V \leq 2$ | 1195 | 0 | 0 |
| $2 < V \leq 3$ | 2349 | 0 | 0 |
| $3 < V \leq 4$ | 1907 | 73 | 139.211 |
| $4 < V \leq 5$ | 1630 | 209 | 340.67 |
| $5 < V \leq 6$ | 1079 | 415 | 447.785 |
| $6 < V \leq 7$ | 429 | 714 | 306.306 |
| $7 < V \leq 8$ | 142 | 1,123 | 159.466 |
| $8 < V \leq 9$ | 26 | 1,648 | 42.848 |
| $9 < V \leq 10$ | 1 | 2,268 | 2.268 |
| Total | 8760 | 55,409 | 1438.554 |

El aerogenerador empieza a producir energía a partir de los 3 m/s, con una potencia de 73 kW, en la Tabla III, se observa que la máxima producción de energía anual de 447MWh la tendría en una velocidad promedio de viento de 5.5 m/s, presentes en 1,079 hrs del año, Fig. 14. La energía anual generada sería de 1.4 GWh, la cual podría producir el aerogenerador en 440 hrs de operación a condiciones nominales donde la velocidad promedio de viento es de 13 m/s.

IV. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos de este estudio se concluye que el recurso eólico no es del todo rentable para el aerogenerador escogido. La velocidad de viento promedio anual ronda entre los 3 y 4 m/s, con estas velocidades promedio habría una baja producción de energía eléctrica, que, en términos de costos, no es beneficioso para el proyecto, lo cual puede ser corroborado con la producción de energía anual del aerogenerador Vestas 112-3.3 seleccionado. Ya que el factor de capacidad estaría por debajo del 20%, lo que indica que, si esto sucede en cualquier sistema de generación, este sistema se considera de forma preliminar no factible económicamente.

Con todo esto, se tiene que replantear la idea de qué tipo de aerogenerador se debe utilizar para aprovechar las características del recurso eólico local. Se recomienda usar micro aerogeneradores de eje vertical, ya que estos funcionan a una velocidad menor, lo que permitiría aprovechar los recursos que nos ofrece el viento en Mazatlán.

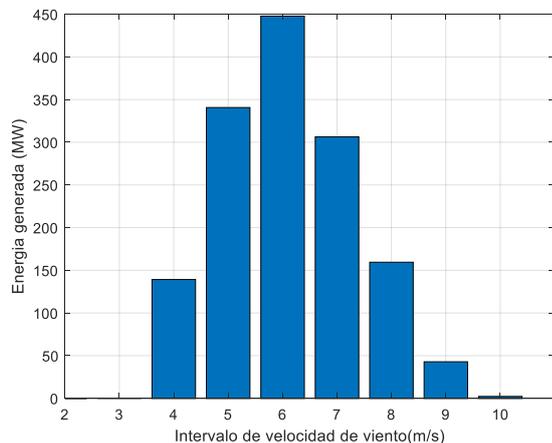


Fig. 14. Cantidad de energía producida.

REFERENCIAS

- [1] X. Sun, D. Huang and G. Wu, The current state of offshore wind energy technology development, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544212001685>.
- [2] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México trabaja en la reducción de CO2 y en fortalecer la adaptación al cambio climático, gob.mx, 2021. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/dia-mundial-por-la-reduccion-de-las-emisiones-de-carbono-co2?idiom=es>.
- [3] RUOA UNAM, Observatorio Atmosférico Mazatlán, 2017. [Online]. Available: <https://www.ruoa.unam.mx/index.php?page=estaciones&st=mazt&id=12>.
- [4] P. Stackhouse, NASA POWER | Data Access Viewer, Power.larc.nasa.gov, 2021. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- [5] L. Bauer, Vestas V112-3.3 - 3,30 MW - Aerogenerador, Es.wind-turbine-models.com, 2021. [Online]. Available: <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/693-vestas-v112-3.3>.
- [6] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, Wind Energy Explained. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [7] Medidas de la velocidad y dirección del viento, Sc.ehu.es, 2021. [Online]. Available: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/viento/viento.html>.
- [8] J. A. Carta González, R. C. Pérez, A. Colmenar Santos, M. A. Castro Gil, Centrales de energías renovables Generación eléctrica con energías renovables. Madrid: PEARSON EDUCACION, S.A., 2009.

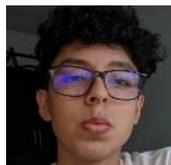
BIOGRAFÍAS



JEAN C. VELARDE Actualmente cursa el cuarto cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son los Sistemas Eléctricos y las Energías Renovables.



KARLA A. PERAZA Actualmente cursa el cuarto cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son las Matemáticas, las Energías Renovables y la Energía Nuclear.



ALDER DEL ANGEL Actualmente cursa el cuarto cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son la Física, la Energía Nuclear, Energía Solar y Energía Eólica.



EBER E. OROZCO G. Es Licenciado en Física por la Universidad de los Andes (Venezuela), cuenta con Maestría y Doctorado en Ciencias por el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE-México), además tiene una especialidad en Formación de Docentes. Actualmente es profesor de tiempo completo en la carrera de Ing. en Energía de la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son la Óptica y las Energías Renovables.



NÉSTOR D. GALÁN H. Obtuvo el grado de Ingeniero Electromecánico por el Instituto Tecnológico de Acapulco, México. La Maestría y el Doctorado en Ciencias en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV-Guadalajara), México, en la especialidad de Sistemas Eléctricos de Potencia. Actualmente es profesor de tiempo completo en la carrera de Ing. en Energía de la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Sus líneas de interés son los Sistemas de Potencia, Máquinas Eléctricas y las Energías Renovables.