

Recibido 31 de julio de 2023. Aceptado 27 de febrero de 2024. Publicado el 31 de mayo de 2024.

ISSN: 2448-7775

# Aprovechamiento del Viento: Propuesta para la Generación Sostenible de Energía en Santa María del Mar, Oaxaca, México

ALEXANDER VALDEZ SÁNCHEZ, RAMÓN SALOMÉ FLORES MARTÍNEZ, EMILIANO IBARRA NAVARRETE, PEDRO LINN WONG, EBER ENRIQUE OROZCO GUILLÉN, NÉSTOR DANIEL GALÁN HERNÁNDEZ\*

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

\*Autor de Correspondencia: ngalan@upsin.edu.mx

**RESUMEN** Ante la creciente demanda de energía eléctrica en el municipio de Santa María del Mar, Oaxaca, y sus alrededores, se busca impulsar la sostenibilidad energética de la región mediante el aprovechamiento de las fuentes de energías limpias. En este contexto se plantea llevar a cabo un estudio del potencial eólico local en un periodo de cinco años, utilizando la base de datos proporcionada por la NASA. Este estudio comprende un análisis estadístico detallado, que incluye la evaluación de los valores promedio horarios, la dispersión de velocidades, las distribuciones de frecuencia y densidades de probabilidad de Weibull. A partir de los resultados obtenidos se propone la implementación del aerogenerador Siemens SWT-3.6-130 con el objetivo de estimar la capacidad de generación eléctrica anual de la zona. Asimismo, se plantea la posibilidad de establecer un parque eólico que pueda satisfacer las demandas energéticas locales. El comportamiento del parque es analizado en condiciones nominales con un estudio de flujos de carga utilizando el software ETAP.

**PALABRAS CLAVE**— Potencial eólico, Generación eléctrica, Flujos de potencia.

## I. INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más preocupado por el agotamiento de los recursos naturales y los impactos del cambio climático, la búsqueda de fuentes de energía renovable se ha convertido en una prioridad global. En este contexto, la energía eólica ha emergido como una solución prometedoras y sostenible para satisfacer nuestras necesidades energéticas utilizando la fuerza del viento para generar electricidad, la cual se considera una forma limpia y abundante de energía.

En los últimos años, se ha reconocido la importancia de aprovechar al máximo las zonas con un recurso eólico excepcional ya que, al presentar vientos constantes y fuertes, las convierte en lugares ideales para la instalación de parques eólicos (PE). Al centrar nuestros esfuerzos en estas zonas privilegiadas, podemos maximizar la eficiencia y la rentabilidad de la energía eólica, al tiempo que reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales asociados.

El viento, al ser una fuente de energía renovable, no solo es inagotable, sino que también está disponible en abundancia en ciertas áreas geográficas. Al instalar aerogeneradores en lugares con un recurso eólico sobresaliente, podemos aprovechar de manera óptima esta energía limpia y convertirla en electricidad a gran escala. Esto no solo contribuye a diversificar la matriz energética,

sino que también nos acerca a la meta de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático.

El estudio de los flujos de potencia de los PE interconectados a la red es esencial para asegurar una integración eficiente y confiable de la energía eólica en el sistema eléctrico. Ayuda a optimizar la capacidad de la red, garantizar la estabilidad del sistema y mejorar el rendimiento general de la generación y transmisión de energía.

Hablando de recurso eólico México es muy conocido por una zona en específico, la cual es el istmo de Tehuantepec, en la que debido a ciertas condiciones climatológicas y topográficas se genera una serie de fenómenos los cuales culminan proporcionando fuertes rachas de viento a lo largo de todo del año la zona [1].

La problemática principal de las centrales eólicas es su intermitencia y consumo de reactivos por parte de los generadores asíncronos de los aerogeneradores. Sumado a esto el costo de la energía eléctrica suele ser mayor que los combustibles fósiles lo cual tiende a disminuir el apoyo por los gobiernos y mucho menos llamativo para el sector privado [1].

Frente a las crecientes necesidades energéticas que enfrenta el Municipio de Santa María del Mar, ubicado en

Juchitán, Oaxaca, y que ha padecido durante 13 años la carencia en el suministro de energía eléctrica por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [2], este estudio persigue el propósito de llevar a cabo un análisis exhaustivo del potencial eólico en esta región. El propósito primordial de este estudio reside en evaluar la viabilidad de establecer un parque eólico capaz de satisfacer eficientemente las necesidades energéticas locales a un costo reducido por kWh, con un enfoque constante en la preservación de la sustentabilidad ambiental de la región.

## II. DESARROLLO

La aplicación de la energía cinética del viento en la actualidad es sumamente relevante, debido a su carácter cíclico el cual proporciona un perfil de viento con ciertas tendencias a lo largo de cada año, que puede ser aprovechado en el sector energético. Para ello se debe realizar previamente un estudio de análisis de recurso eólico.

Al comienzo de un estudio del recurso eólico se deben de obtener los datos a analizar, los cuales son proporcionados por estaciones meteorológicas de la región o por otros medios. Los datos recopilados incluyen la magnitud de las velocidades del viento promedio horarias (8,760 hrs/año) y la altitud a la cual se registraron, parámetros de gran importancia para el análisis estadístico de los datos.

### A. METODOLOGÍA

Los datos utilizados en este estudio se obtienen de la base de datos NASA POWER LARC [3]. Se abarcó un periodo de cinco años, desde 2018 hasta 2022, con el fin de establecer un año promedio para llevar a cabo las diversas evaluaciones propuestas en este artículo.

Para evaluar las velocidades del viento, se extrapolaron los datos desde la altura de medición original a una altura de 150 metros. Esta altura es relevante, ya que corresponde a la ubicación del buje del aerogenerador seleccionado. El propósito de esta extrapolación es calcular con precisión el aporte energético que podrían generar los aerogeneradores situados en esa región.

En el proceso de extrapolación, se aplicó la ley de Hellman, tal como se describe en la Ec. (1),

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{h}{h_r}\right)^a, \quad (1)$$

Donde  $v_r$  es la velocidad medida,  $h$  la altura deseada,  $h_r$  la altura a la que se midieron los datos y  $a$  el coeficiente del tipo de terreno [4].

Una vez que se dispone de los datos a la altura requerida, procedemos a calcular los parámetros de concentración y dispersión, tal como se detallan en las Ec. (2)-(4), [5]:

Media aritmética,

$$v_w = \frac{1}{N} \cdot \left( \sum_{i=1}^N v_{i=1} \right), \quad (2)$$

Desviación estándar,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - v_w)^2}, \quad (3)$$

Se estima la intensidad de la turbulencia,

$$I_t = \frac{\sigma}{v_w}. \quad (4)$$

Los estudios de distribuciones de frecuencias se realizan con la finalidad de clasificar las velocidades de viento según la frecuencia en que se presentan a lo largo del año, Ec. (5)-(7), [6].

Frecuencia relativa,

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

Frecuencia acumulada menor o igual que,

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

Frecuencia acumulada mayor que,

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

Con los datos obtenidos se puede estimar la energía que proporciona un aerogenerador a partir de la curva característica de este, relacionando la potencia y la frecuencia de la clase en cada intervalo de velocidad de viento.

El último estudio que se realiza a las velocidades de viento es el de la Distribución de Probabilidad de Weibull (FDPW), Ec. (8)-(10):

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k}, \quad (8)$$

donde el factor de forma y escala son determinados por:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_w}\right)^{-1.086} \quad (9)$$

$$c = \frac{v_w}{\Gamma(x)} \quad (10)$$

donde  $\Gamma(x)$  es la función gamma de  $x$ .

La FDPW permite predecir qué tan probable es que se presente cierta velocidad de viento a partir del rango de parámetros de centralización y dispersión presentes en el año.

Para determinar la cantidad de aerogeneradores que se instalarán en la zona, se lleva a cabo el dimensionamiento del Parque Eólico utilizando la aplicación Google Earth. En este escenario, se trata de una zona costera con una extensión aproximada de 6 kilómetros. La disposición consiste en la instalación de 10 aerogeneradores, manteniendo una distancia proporcional al diámetro de sus rotores.

El aerogenerador propuesto para llevar a cabo este estudio es el Siemens SWT-3.6-130. La elección se basa en su curva de potencia, que presenta una mayor inclinación en velocidades de viento más bajas. Esto se refleja en una mayor producción de energía a bajas velocidades de viento y un aumento en las horas de trabajo a condiciones nominales. En la Fig. 1, se presenta la curva característica de potencia y coeficiente de potencia  $C_p$ , que, en conjunto con la frecuencia de la clase de viento, nos permite estimar la energía generada anualmente por cada aerogenerador y por el PE en su totalidad.

El comportamiento del PE en estado estable interconectado a la red se analiza con el software ETAP®, realizando un estudio de flujos de potencia basado en el algoritmo de Newton-Raphson. Se realiza el diagrama unifilar del PE que consta de dos circuitos radiales de 5 aerogeneradores con un transformador por máquina y una subestación de interconexión del PE con la red eléctrica, distribuyendo cada máquina con un espaciado de 520 m entre cada unidad el cual satisface la recomendación de la norma mexicana NMX-J-673-25-4-ANCE-2018 que estipula que los aerogeneradores en una fila tengan al menos el doble del diámetro de su rotor de separación entre ellos, y que la distancia entre filas sea al menos ocho veces el diámetro del rotor, esto debido al efecto sombra que se produce cuando el viento que llega a un aerogenerador está alterado por otro aerogenerador. Esto provoca una disminución de la potencia generada y un aumento de las turbulencias y las cargas mecánicas sobre las máquinas [2], [8].

Para este estudio se considera a cada unidad conectada a un transformador de máquina de 4.5 MVA respetando los límites de operación de un transformador el cual debe de estar al 80% de su capacidad nominal, según la norma. Los transformadores tienen una relación de transformación de 690V/34.5kV para su conexión a los circuitos de MT que alimentan la subestación de potencia, la cual se interconecta a la red eléctrica en AT a 115 kV, para transportar la energía a través de la red.

Se estudia que la potencia generada y suministrada a la red eléctrica sea suficiente para cubrir las necesidades energéticas de la comunidad de Salinas Cruz. Para determinar estas necesidades, se toman en cuenta datos proporcionados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) [9] y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [10]. A partir de esta información, se estima el consumo eléctrico anual del sector doméstico, considerando el número promedio de personas por hogar y la población total de la localidad, lo que arroja un consumo anual de 40.93 GWh anuales.

### III. RESULTADOS

Los valores obtenidos del estudio de viento se procesan mediante el software MATLAB®. En la Fig. 2 se aprecia el promedio de velocidades a 50 m.

Sintetizando la variabilidad del viento a lo largo de los cinco años de análisis, se determina un año promedio basado en las 43,800 hrs medidas en dicho período. Luego, se procede a extrapolar los datos a una altura de 150 metros, utilizando la Ley de Hellman, Fig. 3, con el objetivo de estimar las velocidades del viento que alcanzarían la altura del rotor del aerogenerador. Los parámetros del año promedio de la zona son:

- Velocidad media: 9.1961 m/s
- Desviación Estándar: 3.1683 m/s
- Intensidad de Turbulencia: 0.3445.

Las frecuencias de viento obtenidas por hora son aprovechables la mayor parte del año, como se muestra en las curvas de frecuencia relativa acumulada mayor y menor que, Fig. 4, y en el histograma de frecuencias relativas mostrado en la Fig. 5.

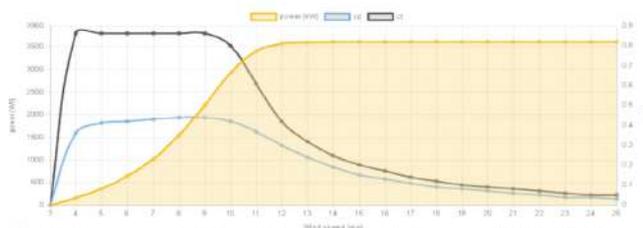


Fig. 1. Curvas características del aerogenerador Siemens SWT-3.6-130.

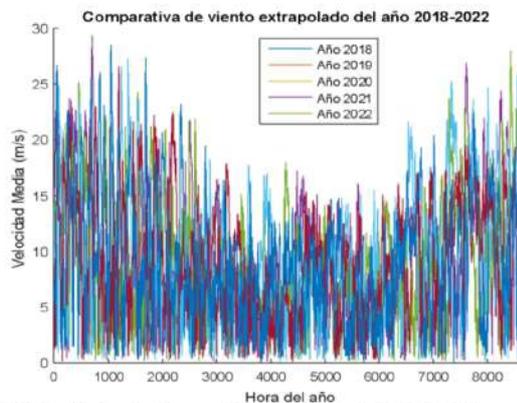


Fig. 2. Velocidades de viento a 50 m de altura del 2018-2022.

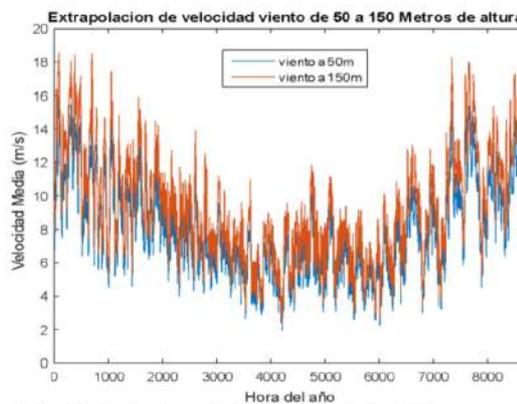


Fig. 3. Velocidades de viento del año extrapolado a 150 m.

La dirección de viento es de suma importancia, ya que, si esta es muy variada se traduce directamente en un gasto energético para la rotación de la góndola del aerogenerador, buscando que el impacto del viento con las palas sea de manera perpendicular. En este caso se utiliza el script de ROSVI [11] para elaborar el gráfico polar, Fig. 6. En la Fig. 6, se puede apreciar que, durante el período de análisis de cinco años, la dirección predominante de los vientos ha sido hacia el norte, representando aproximadamente el 45% de la totalidad de vientos que influyen en la región. La probabilidad de tener una velocidad de viento elevada se puede observar en la Fig. 7. Donde se verifica que la moda se encuentra sobre los 5 m/s.

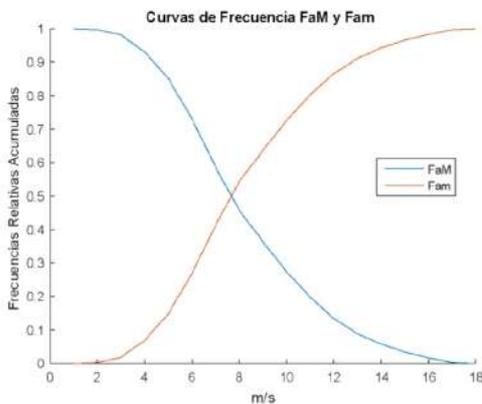


Fig. 4. Curvas de frecuencia acumulada mayor que y menor que.

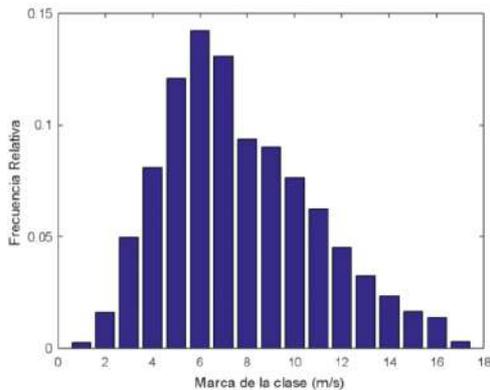


Fig. 5. Histograma de frecuencia relativas de velocidades de viento.

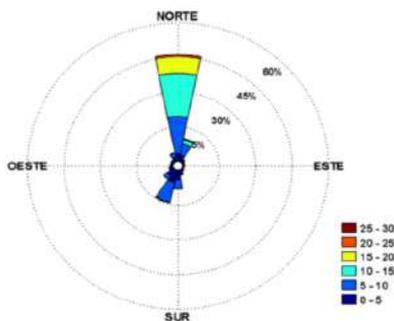


Fig. 6. Rosa de los vientos.

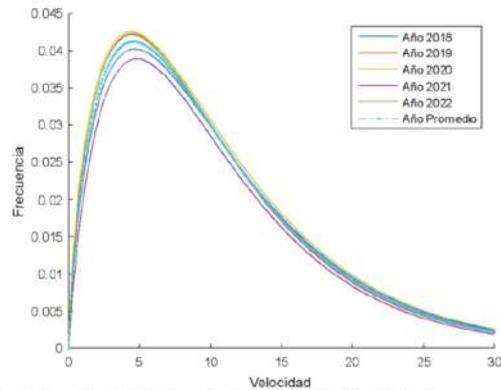


Fig. 7. Función de Distribución de Probabilidad de Weibull.

Multiplicando la potencia que proporciona el aerogenerador a cierto rango de velocidad de viento con la frecuencia de la clase, Tabla I, se obtiene la energía generada al año. En la Fig. 8 se muestra el histograma de producción de energía anual en la zona de estudio. Según los datos presentados en la Tabla I, se estima que cada aerogenerador generará una producción anual de 20 GWh en el Punto de Conexión Común (PCC), lo que resultará en una contribución de 200 GWh de energía al sistema eléctrico nacional anualmente.

La Fig. 9 muestra los resultados del análisis de flujos de potencia, donde se llevaron a cabo dos tipos de estudios. El primero se realiza sin compensación de reactivos para determinar la potencia reactiva consumida por el parque eólico. En este caso, se registra un consumo de 20.464 MVar. El segundo estudio se realiza con compensación de reactivos, donde se instalaron 4 bancos de capacitores para compensar la potencia reactiva consumida por las máquinas de inducción, Anexos.

TABLA. 1. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ANUAL DEL AEROGENERADOR SIEMENS SWT-3.6-130 EN BASE A LA MARCA DE CLASE, FRECUENCIA DE LA CLASE Y POTENCIA.

Clase	Frecuencia	P (kW)	Energía (MWh)
Vc	22	0	0
3<= V<4	142	150	21.3
4<= V<5	435	310	134.85
5<= V<6	709	600	425.4
6<= V<7	1058	1000	1058
7<= V<8	1246	1650	2055.9
8<= V<9	1146	2250	2578.5
9<= V<10	822	3000	2466
10<= V<11	791	3400	2689.4
11<= V<12	669	3520	2354.88
12<= V<13	545	3600	1962
13<= V<14	396	3600	1425.6
14<= V<15	282	3600	1015.2
15<= V<16	206	3600	741.6
16<= V<17	145	3600	522
17<= V<18	121	3600	435.6
18<= V<19	25	3600	90
19<= V<20	0	3600	0
<b>Total</b>	<b>8760</b>	<b>GWh--&gt;</b>	<b>19.97623</b>

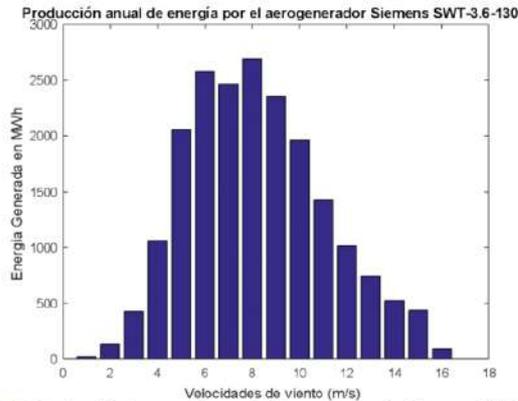


Fig. 8. Producción de energía anual del aerogenerador Siemens SWT-3.6-130.

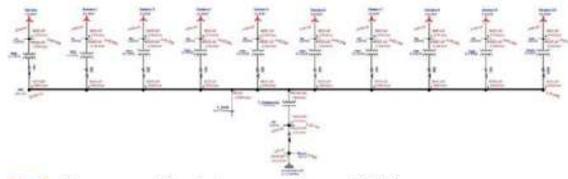


Fig. 9. Diagrama unifilar del parque eólico en ETAP.

En los resultados de los flujos de potencia se observa que se inyecta a la red eléctrica una potencia de 35.7 MW en condiciones nominales de operación del PE.

#### IV. CONCLUSIONES

Al completar este estudio, podemos confirmar que la región seleccionada para la evaluación del potencial eólico presenta condiciones altamente favorables. Presentándose velocidades de viento por arriba de la media en meses de inicio y fin de año. De los resultados se observa que el aerogenerador propuesto, basados en el año promedio, funcionará en condiciones nominales en 1,314 hrs/año y por arriba del 65% de su capacidad en 3,153 hrs/año, aprovechando los vientos predominantes con dirección norte. La mayor entrega de energía se dará a una velocidad de viento de 6 m/s y a los 8 m/s.

El parque eólico funcionando en condiciones nominales requiere una compensación de potencia reactiva de 20.5 MVar para compensar sólo el consumo de los generadores de inducción, sin considerar las pérdidas de reactivos de la subestación de potencia de 3.5 MVar.

Se considera que el impulso a este tipo de tecnología permitirá a México alcanzar la meta de generación mediante energía limpia y renovable para 2030.

Como alternativa de conexión al anterior estudio, se propone crear una línea de transmisión de 230 kV para transmitir la potencia generada desde las instalaciones del PE hasta Juchitán de Zaragoza, lo cual sería muy útil, ya que el recurso eólico es abundante en la zona del Istmo de

Tehuantepec, por lo que una línea de ese tipo permitiría transportar la energía eléctrica de la central eólica propuesta en conjunto a otras futuras centrales de generación e inyectar esa energía al SIN [12].

#### REFERENCIAS

- [1] C. Martín del Campo-Márquez, P.F. Nelson-Edelstein, M.Á. García-Vázquez, "La energía del viento en México: Simulación de un parque eólico y aplicación de análisis probabilístico de seguridad", Redalyc, ISSN: 1405-7743, Vol.[X], pp.343-352, 2009.
- [2] Dulce Sánchez, "Propuesta de Generación de energía eléctrica por medio de un sistema eólico en la comunidad de Santa María del Mar, Juchitán Oaxaca," Tesis de Ing. Eléctrica. UNAM, Cd. De México, 2019.
- [3] NASA Langley Research Center. NASA Power LARC [Software]. Hampton, VA: NASA Langley Research Center. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/>. (Accesado, mayo 05, 2023).
- [4] R. Vidal, "Evaluación del recurso eólico en la universidad Tecnológica de Ciudad Juárez", Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Departamento de posgrado (CIMAV) Repositorio Institucional, pp. 79, Chihuahua, Chihuahua, Octubre 2014.
- [5] Jean Carlo Velarde Meza, Karla Alely Peraza Regalado, Alder Del Ángel Soto, Eber Enrique Orozco Guillén, Néstor Daniel Galán Hernández. Análisis del recurso eólico y potencial energético de Mazatlán, Sinaloa, Revista Identidad Energética, ISSN: 2448-7775, Vol. 4, 2021.
- [6] J. A. Carta González, R. C. Pérez, A. Colmenar Santos, M. A. Castro Gil, Centrales de energías renovables Generación eléctrica con energías renovables. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2009.
- [7] Siemens Wind Power. Siemens SWT-3.6-130. [En línea]. Disponible en: <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/1468-siemens-sw-3-6-130>. (Accesado, junio 19, 2023).
- [8] Distancias entre aerogeneradores. Ideas medioambientales. Accedido el 13 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://ideasmedioambientales.com/distancias-entre-aerogeneradores/>
- [9] SEMARNAT,. Consumo de Energía por Hogar 2016. Disponible en: [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex-D\\_2\\_ENERGIA06\\_20&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce&NOMBREENTIDAD=\\* &NOMBREANIO=](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex-D_2_ENERGIA06_20&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREANIO=). (Accesado, Mayo 11, 2023).
- [10] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. División municipal de Oaxaca. Disponible en: [https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/oax/territorio/div\\_municipal.aspx?tema=me&e=20](https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/oax/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=20). (Accesado, junio 8, 2023).
- [11] D. Correa. (2023). Fismatlab. Aplicativo ROSVI para rosa de los vientos. [Online] Disponible en: <https://fismatlab.blogspot.com>

#### BIOGRAFÍAS



energéticas.

**ALEXANDER VALDEZ SÁNCHEZ** Actualmente cursa el sexto cuatrimestre de la Licenciatura de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Experiencia como practicante en auditorías energéticas en el sector industrial y proyectos de instalación de sistemas fotovoltaicos. Sus líneas de interés son la planificación e instalación de sistemas eléctricos industriales, sistemas de gestión y auditorías



renovables en el sector automotriz, el desarrollo de biorrefinerías y auditorías energéticas.

**RAMÓN S. FLORES MARTÍNEZ** Estudiante de la Licenciatura de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Con experiencia como practicante en la instalación de sistemas fotovoltaicos y sistemas eléctricos básicos, además de participación en mantenimiento y desarrollo técnico en motores de combustión interna. Actualmente sus líneas de interés son la implementación de energías



**EMILIANO IBARRA NAVARRETE** Cursa el sexto cuatrimestre de la Licenciatura en Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, Sinaloa, México. Practicante en laboratorio de biomasa en el sector de investigación, participe en instalación de sistemas fotovoltaicos y diseño de aerogeneradores. Asimismo, sus intereses giran en torno a la distribución de energía, uso eficiente y ahorro de esta, así como las auditorías energéticas.



**PEDRO Y. LINN-WONG** Cursa el sexto cuatrimestre de la Licenciatura de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Con experiencia y participación en la instalación de sistemas fotovoltaicos y diseño de prototipos de aerogeneradores para la producción de energía eólica, además con bastante interés en la producción de Energía Nuclear, Eólica y de la Biomasa.



**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.



**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, Generación Distribuida con Energías Renovables.

ANEXOS

