

DESARROLLO DE UN PROCESO ESCALA LABORATORIO PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EÓLICA CON LA TURBINA TIPO ESPIRAL DE ARQUÍMEDES

DEVELOPMENT OF A LABORATORY SCALE PROCESS FOR THE PRODUCTION OF WIND ENERGY WITH THE ARCHIMEDES SPIRAL TURBINE

Julio Pineda-Insuasti ¹, Ángela León-Chamorro ², Alejandro Pineda-Soto ³

¹**Dirección Gestión Alimentaria.** Centro Ecuatoriano de Biotecnología del Ambiente -CEBA. Ibarra, Ecuador.

²**Dirección Gestión Energética.** Centro Ecuatoriano de Biotecnología del Ambiente -CEBA. Ibarra, Ecuador.

³**Dirección Gestión de Innovación.** Centro Ecuatoriano de Biotecnología del Ambiente -CEBA. Ibarra, Ecuador.

Autor para correspondencia: energia.ceba@gmail.com

Recibido: 22/11/24

Aceptado: 22/12/24

Publicado: 30/12/24

RESUMEN

Se identifica que existe limitado conocimiento sobre el proceso de transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica y su transformación final en energía eléctrica.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un proceso a escala de laboratorio para la producción de energía eólica con la turbina tipo espiral de Arquímedes, a partir de la fuente de viento disponible, que permita el máximo aprovechamiento de los recursos naturales.

La investigación se realizó con un diseño experimental factorial 2² se consideró como factores de estudio velocidad del viento en los niveles de 3 y 7 m/s y la dirección del viento respecto al radio de la turbina en los niveles de 2 y 5 cm. Se logra un óptimo de Tensión Eléctrica igual a 12,8467 V, cuando se trabaja con una velocidad de viento de 7 m/s y una distancia de 5 cm respecto al radio de la Turbina tipo espiral Arquímedes.

Se ajustó un modelo matemático empírico que relaciona la Tensión Eléctrica con los factores estudiados, lo que permite optimizar el proceso. Se recomienda continuar con la investigación en las escalas de banco y piloto.

Palabras clave: Energía, eólica, turbina, aerogenerador.

ABSTRACT

It is identified that there is limited knowledge about the process of transformation of the kinetic energy of the wind into mechanical energy and its final transformation into electrical energy.

The objective of this research is to develop a laboratory-scale process for the production of wind energy with the Archimedes spiral turbine, from the available wind source, which allows the maximum use of natural resources.

The research was carried out with a 22 factorial experimental design, considering as study factors the wind speed at the levels of 3 and 7 m/s and the wind direction with respect to the radius of the turbine at the levels of 2 and 5 cm. An optimum Electrical Voltage equal to 12.8467 V is achieved, when working with a wind speed of 7 m/s and a distance of 5 cm with respect to the radius of the Archimedes spiral turbine.

An empirical mathematical model was adjusted that relates the Electrical Voltage with the factors studied, which allows the process to be optimized. It is recommended to

continue research at the bench and pilot scales.

Keywords: Energy, wind, turbine, wind turbine.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha ido incrementando de manera progresiva y evidenciándose en distintos ámbitos del desarrollo de la vida como la conocemos, uno de los principales factores que aportan a estos cambios es la generación de energía eléctrica, por lo que se han alterado los recursos de energía renovable. En Europa, se espera un aumento en la generación hidroeléctrica en el norte, mientras que la generación solar y eólica podría aumentar en regiones específicas como Alemania, el Reino Unido y la Península Ibérica (Peter, J, 2019) (Stanton, M., Dessai, S., & Paavola, J., 2016) (Schlott, M., Kies, A., Brown, T., Schramm, S., & Greiner, M., 2018).

En la generación de energía térmica se ve afectada su eficiencia, con el aumento de temperatura en el agua y por lo tanto la necesidad de enfriar los equipos, lo que afecta negativamente la producción de electricidad (Mideksa, T., & Kallbekken, S., 2010) (Golombek, R., Kittelsen, S., & Haddeland, I., 2011).

Los cambios en temperatura y precipitación han permitido que se viabilicen la generación de energía geotérmica dependiendo de la región a la que pertenece la población y desarrollando tecnologías que sean eficientes con estos desarrollos (Mideksa, T., & Kallbekken, S., 2010) (Craig, M., Cohen, S., Macknick, J., Draxl, C., Guerra, O., Sengupta, M., Haupt, S., Hodge, B., & Brancucci, C., 2018).

Se conoce que a finales del 2024 estamos muy cercanos al incremento de 1,5 grados centígrados a la temperatura nominal del planeta Tierra por lo que la demanda de los sistemas de enfriamiento (aires condicionados) sigue aumentando y esto genera un mayor consumo energético

produciendo así altos picos de consumo (Mideksa, T., & Kallbekken, S., 2010) (Auffhammer, M., Baylis, P., & Hausman, C., 2017) (Franco, G., & Sanstad, A., 2008).

La adaptación a estos cambios ha producido que las infraestructuras de generación energética cambien y se actualicen hacia nuevas tecnologías que aportan de manera más eficiente y amigables con el medio ambiente (Peter, J, 2019) (Schlott, M., Kies, A., Brown, T., Schramm, S., & Greiner, M., 2018). Los impactos agregados del cambio climático pueden requerir ajustes en la planificación y operación del sistema eléctrico, incluyendo la necesidad de más capacidad de reserva operativa y cambios en la distribución de recursos (Craig, M., Cohen, S., Macknick, J., Draxl, C., Guerra, O., Sengupta, M., Haupt, S., Hodge, B., & Brancucci, C., 2018) (Steinberg, D., Mignone, B., Macknick, J., Sun, Y., Eurek, K., Badger, A., Livneh, B., & Averyt, K., 2020).

El cambio climático tiene un impacto significativo en la generación de energía eléctrica, afectando tanto la oferta como la demanda. Los sistemas eléctricos deben adaptarse para manejar estos cambios, lo que implica ajustes en la infraestructura y planificación para asegurar un suministro confiable y eficiente.

Las energías renovables son fuentes de energía limpia, ilimitadas y cada vez más competitivas. Son fuentes de energía basadas en la utilización de recursos naturales: el sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero.

Una de las alternativas que mejor resultado, con relación a eficiencia, han proporcionado es

la energía eólica puesto que logran optimizar la conversión de energía del viento en electricidad, minimizando pérdidas y maximizando la producción de energía. Entre los sistemas más eficientes se encuentran los generadores de velocidad variable y los generadores de inducción doblemente alimentados.

Los generadores de velocidad variable son sistemas que incluyen generadores síncronos y generadores directamente acoplados con convertidores de frecuencia, pueden ser casi tan eficientes como los sistemas de velocidad constante, aunque presentan mayores pérdidas a plena carga. Sin embargo, la eficiencia de la turbina aumenta con la velocidad variable, lo que no se incluyó en algunos estudios (Grauers, A., 1996).

Generadores directamente acoplados, permiten la eliminación de engranajes, pueden ser más eficientes que los generadores convencionales de cuatro polos equipados con engranajes (Grauers, A., 1996).

Generadores de inducción doble alimentación (DFIG), estos sistemas utilizan un esquema de control de eficiencia óptima que combina la minimización de pérdidas y el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), lo que permite una generación máxima de energía eléctrica y extiende el rango de velocidad del viento explotable (Karakasis, N., Tsioumas, E., Jabbour, N., Bazzi, A., & Mademlis, C., 2019).

Sistemas de control avanzado, son sistemas que emplean controladores de pérdida mínima y técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia, como el control basado en lógica difusa, han demostrado mejorar la eficiencia al maximizar la potencia de salida de la turbina eólica (Mesemanolis, A., Mademlis, C., & Kioskeridis, I., 2012).

Los sistemas de generación eólica más eficientes son aquellos que utilizan tecnologías avanzadas de control y generadores de

velocidad variable, como los generadores de inducción doblemente alimentados y los generadores directamente acoplados. Estos sistemas optimizan la conversión de energía y minimizan las pérdidas, lo que resulta en una mayor eficiencia en la generación de energía eólica.

Con lo antes mencionado la turbina eólica de Arquímedes bajo el proyecto Liam F1 se destaca por su eficiencia en el mercado actual debido a varias características innovadoras y optimizaciones tecnológicas.

De la cual la eficiencia mecánica respecto de la eficiencia de generación eléctrica es una de las principales características, la turbina de Arquímedes es un tipo de turbina de arrastre de eje horizontal que no puede ser analizada por métodos tradicionales como la teoría del Elemento de Momento de la Cuchilla (BEM) o el Método de Doble Tubo de Corriente (DSTM). En su lugar, se utiliza la dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar su rendimiento. Los estudios han mostrado que el coeficiente de potencia máximo, que indica la eficiencia mecánica del rotor, es de 0.293 con una relación de velocidad de punta de 2.19. Además, la eficiencia eléctrica se ha evaluado en relación con la velocidad de rotación del generador, lo que permite predecir la curva de potencia de la turbina con un error máximo de menos del 7.80% entre la predicción y la medición real (Jang, H., Kim, D., Hwang, Y., Paek, I., Kim, S., & Baek, J., 2019).

Optimización del Punto de Máxima Potencia

El sistema de generación de energía eólica de la turbina Liam F1 incorpora un rastreador de punto de máxima potencia (MPPT) basado en el algoritmo de optimización de Arquímedes (AOA). Este sistema optimiza el ciclo de trabajo del convertidor para maximizar la potencia de salida, demostrando ser más robusto y eficiente en comparación con otros métodos como la búsqueda del cuco (COA) y el algoritmo de optimización de saltamontes

(Fathy, A., Alharbi, A., Alshammari, S., & Hasanien, H., 2021).

La turbina eólica de Arquímedes bajo el proyecto Liam F1 es altamente eficiente debido a su diseño innovador que maximiza tanto la eficiencia mecánica como la eléctrica, y a la implementación de un avanzado sistema de optimización para el seguimiento del punto de máxima potencia. Estas características la posicionan como una de las opciones más eficientes en el mercado actual.

Se identifica que existe limitado conocimiento sobre el proceso de transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica y su transformación final en energía eléctrica.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un proceso a escala de laboratorio para la producción de energía eólica con la turbina tipo espiral de Arquímedes, a partir de la fuente de viento disponible, mediante análisis de procesos, que permita el máximo aprovechamiento de los recursos naturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudió a escala de laboratorio un proceso para la generación de energía eléctrica a partir del viento, bajo la *Norma IEC 61400-12-1:2022, Sistemas de generación de energía eólica. Parte 12-1: Mediciones del rendimiento energético de turbinas eólicas productoras de electricidad*. El trabajo experimental se realizó en el Laboratorio de Energías Renovables del Centro Ecuatoriano de Biotecnología del Ambiente (CEBA), localizado en la ciudad de Ibarra, Ecuador a 2200 msnm, con una temperatura promedio de 18 °C.

Recursos Naturales

Como recurso primario se utilizó el viento natural disponible en el ambiente de fecha 22 de diciembre de 2024,

Diseño experimental y análisis estadístico

Como unidad experimental se utilizó un Equipo de Energía Eólica de Laboratorio, el "EEEL-CEBA", es un equipo a escala de laboratorio diseñado para estudiar la energía eólica y la influencia de algunos factores en su generación (figura 1).



Figura 1. Equipo Básico de Energía Eólica Laboratorio "EEEL-CEBA".

Este equipo consiste en un túnel de viento de hierro de 35 cm de diámetro por 64 cm de longitud, un aerogenerador tipo espiral de Arquímedes con rotor y un soplador centrífugo con velocidad variable. La velocidad del aire se varía mediante el cambio de la velocidad rotacional del soplador centrífugo y un sensor (anemómetro) nos permite medir dicha velocidad del aire. Este soplador genera el caudal de aire requerido para que funcione el rotor del equipo de energía eólica. El generador convierte la energía mecánica del rotor de la turbina en energía eléctrica. Mediante un sensor se puede medir la velocidad rotacional del aerogenerador. El equipo incluye un sensor de voltaje y corriente permite medir la tensión y la corriente dadas por el aerogenerador para determinar la potencia, e incluye un módulo de cargas de CC.

Diseño experimental

Como factores de estudio se seleccionó la velocidad del viento en los niveles de 3 m/s y 7 m/s y la dirección del viento respecto al radio de la turbina en los niveles de 2 cm y 5 cm.

Como parámetros de operación se estableció el motor generador de 2 A, la distancia de tiro de aire a la turbina de 28 cm.

Como factores de ruido se identifica la cantidad de luz, la temperatura del ambiente, la humedad y la presión.

Como variable de respuesta se estableció la Tensión Eléctrica medida en Voltios (V).

Se utilizó el software estadístico STATGRAPHICS, para planificar un diseño experimental factorial multinivel estándar 2², con tres replicas, completamente aleatorio, con un total de 12 tratamientos. El diseño se ejecutó en 3 bloques y el orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado para aportar protección contra el efecto de variables ocultas.

Atributos de Diseño Factorial Multinivel

Clase de diseño: Factorial Multinivel

Nombre del archivo: Eóicalab.sfx

Diseño Base

Número de factores experimentales: 2

Número de bloques: 3

Número de respuestas: 1

Número de corridas: 12

Grados de libertad para el error: 6

Aleatorizar: Sí

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
Velocidad viento	3,0	7,0	2	(m/s)
Dirección viento	2,0	5,0	2	(cm)

Respuestas	Unidades
Tensión Eléctrica	(V)

Procedimiento Experimental

En la figura 2, se presenta el diagrama de flujo del proceso experimental.

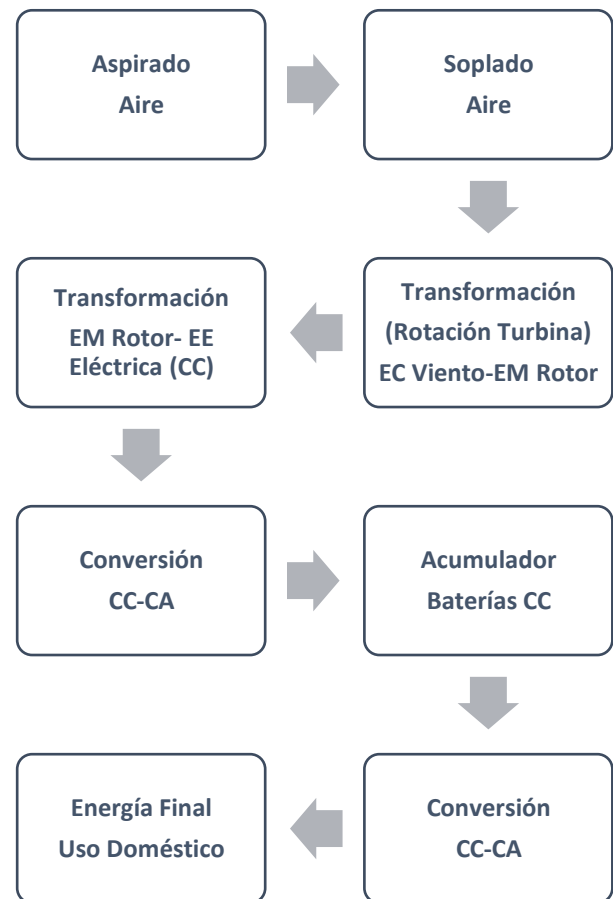


Figura 2. Diagrama de bloque producción de energía eólica.

Se procedió al aspirado y soplado del aire ambiente suministrado por un soplador de tiro forzado (figura 3). Soplador/Aspiradora de cuerpo plástico con potencia de 600W profesional, con una velocidad variable para un fácil control del flujo del aire, 16000,0 rpm y flujo de 3,5 m³/min. Marca STANLEY.



Figura 3. Soplador/aspirador de aire.

La **transformación** de energía cinética del viento en energía mecánica del rotor se realizó con una **turbina eólica tipo espiral de Arquímedes**, escala de laboratorio de 20 cm de diámetro, fabricada localmente por impresión 3D, en material PAL (ácido poliláctico) de color azul, es un plástico derivado del maíz, muy fácil de imprimir, no tóxico, biobasado y compostable (figura 4).



Figura 4. Turbina eólica tipo espiral de Arquímedes.

La **transformación** de energía mecánica del rotor a energía eléctrica se realizó con un DC Micro Motor; voltaje nominal DC 12 V; velocidad (sin carga) 18000 rpm, Corriente nominal 2A; Power nominal: 17 W; Par 5.54 oz/cm (figura 5).



Figura 5. Micro Motor DC 12 V 2 A.

La **conversión** de energía se debe realizar con una placa inversora de 12V a 5V regulados (figura 6), Regulación de carga: $\pm 0.5\%$ inversor de potencia, frecuencia de conmutación bits 340KHZ, Ondulación de salida 30mV universal, eficiencia de conversión 96% convertidor, voltaje de entrada inversores de potencia 7V-12V para vehículos, módulo no aislado reductor al aire libre (figura 6).

-Material: aleación de aluminio, ABS, regulador de voltaje DC-DC de cobre

Regulación de voltaje: $\pm 2.5\%$ usbc

-Tamaño: 6.30X2.70X1.15.7 in/2.48X1.06X0.55in regulador de voltaje del generador

Voltaje de salida: reguladores 5V 3A

Método de rectificación: fuente de alimentación de rectificación síncrona modular



Figura 6. Placa inversora de 12V a 5V

La **acumulación** de la energía se debe realizar en un Power bank de 5 V y 2 A (figura 7).



Figura 7. Power bank de 5 V 2 A

Para la inversión de la energía de CC-CA se debe realizar con un puente de diodos 2 A (figura 8).



Figura 8. Puente de diodos 2 A

La **medición de la velocidad del viento** se realizó con un anemómetro digital de mano, serie BT-100, indicador de temperatura, velocidad del viento y calibrador, de marca BTMETER, acoplado al túnel de viento (figura 9).

Especificaciones:

- Rango de velocidad del viento: 0,67 – 67,1 mph (0,299 – 29,99 m/s)
- Unidades de velocidad: m/s, km/h, ft/min, nudos, mph.
- Rango de temperatura del viento: 14,0 °F-113 °F.
- Unidades de temperatura Opcional: °C/°F



Figura 9. Anemómetro Digital BT-100

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1, se presenta la matriz de resultados experimentales, como se observa se logra un mínimo de voltaje de 3,84 V cuando se trabaja con velocidad del viento de 3 m/s y una distancia de 2 cm respecto al radio de la turbina y un máximo de 13,5 V, cuando se trabaja con una velocidad del viento de 7 m/s y una distancia de 5 cm respecto al radio de la turbina.

Tabla 1. Matriz de Resultados Experimentales

BLOQ UE	Velocidad Viento (m/s)	Dirección Viento (cm)	Tensión Eléctrica (V)
1	7	2	9,92
1	3	5	5,39
1	7	5	12,71
1	3	2	3,91
2	7	2	8,23
2	7	5	12,68
2	3	2	3,84
2	3	5	4,67
3	7	2	8,26
3	3	5	4,62
3	3	2	3,93
3	7	5	13,15

Fuente: Elaboración autor.

Análisis de Varianza para Tensión Eléctrica

En la tabla 2, se presenta el análisis de varianza para Tensión Eléctrica, el ANOVA particiona la variabilidad de Tensión Eléctrica en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 2. Análisis de Varianza para Tensión Eléctrica

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Velocidad viento	124,099	1	124,099	492,34	0,0000
B: Dirección viento	19,0764	1	19,0764	75,68	0,0001
AB bloques	6,94641	2	0,436358	1,73	0,2550
Error total	1,51235	6	0,252058		
Total (corr.)	152,507	11			

Coefficiente de regresión para Tensión Eléctrica

En la tabla 3 se presenta el coeficiente de regresión para Tensión Eléctrica.

Tabla 3. Coeficiente de regresión para Tensión Eléctrica

Coefficiente	Estimado
constante	1,06583
A: Velocidad viento	0,720278
B: Dirección viento	-0,4275
AB	0,253611

Fuente: elaboración propia

Ecuación de regresión del modelo matemático ajustado a los datos:

Tensión Eléctrica = 1,06583 + 0,720278*Velocidad Viento - 0,4275*Dirección Viento + 0,253611*Velocidad Viento*Dirección Viento.

Optimización de la Respuesta

En la tabla 4, se muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza los valores de Tensión Eléctrica sobre la región indicada.

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar Tensión Eléctrica

Valor óptimo = 12,8467

Tabla 4. Optimización

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Velocidad Viento	3,0	7,0	7,0
Dirección Viento	2,0	5,0	5,0

Fuente: Elaboración autor

Diagrama de Pareto Estandarizado

En la figura 10, se presenta el Diagrama de Pareto Estandarizado para Tensión Eléctrica, como se observa, la velocidad del viento, la distancia respecto al radio y su respectiva correlación son significativos, por lo cual dichos factores deben conservarse en el modelo matemático empírico.

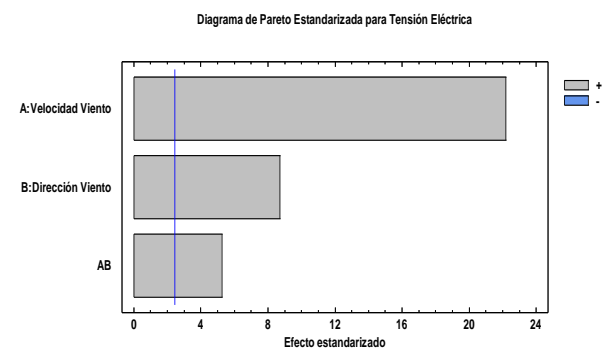


Figura 10. Pareto Estandarizada para Tensión Eléctrica

Superficie de Respuesta Estimada

En la figura 11, se presenta la Superficie de Respuesta Estimada para Tensión Eléctrica, en la cual se puede observar que el punto máximo de Tensión Eléctrica equivalente a 12,8467 V se logra con 7 m/s de velocidad del viento y 5 cm de distancia respecto al radio de la turbina.

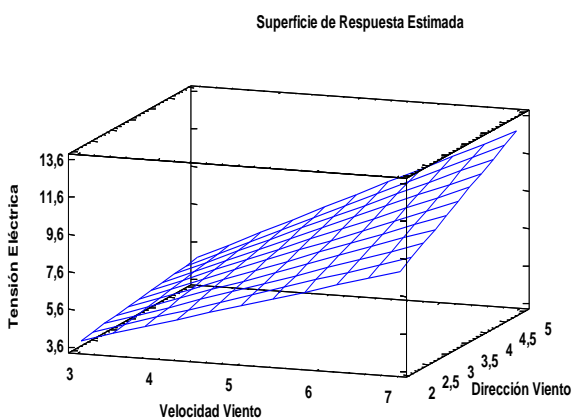


Figura 11. Superficie de Respuesta Estimada

CONCLUSIONES

Es de vital importancia para el país y el planeta el desarrollo de la energía eólica, como una

alternativa para combatir el *cambio climático* generado por el *calentamiento global* debido a los *gases de efecto invernadero (GEI)* y lograr los objetivos de descarbonización.

Se logra un óptimo de Tensión Eléctrica igual a 12,8467 V, cuando se trabaja con una velocidad de viento de 7 m/s y una distancia de 5 cm respecto al radio de la Turbina tipo espiral Arquímedes.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Centro Ecuatoriano de Biotecnología del Ambiente, por su cooperación en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Peter, J. (2019). How does climate change affect electricity system planning and optimal allocation of variable renewable energy? *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113397>
2. Stanton, M., Dessai, S., & Paavola, J. (2016). A systematic review of the impacts of climate variability and change on electricity systems in Europe. *Energy*, 109, 1148-1159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.015>.
3. Schlott, M., Kies, A., Brown, T., Schramm, S., & Greiner, M. (2018). The impact of climate change on a cost-optimal highly renewable European electricity network. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.084>.
4. Mideksa, T., & Kallbekken, S. (2010). The impact of climate change on the electricity market: A review. *Energy Policy*, 38, 3579-3585. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.035>.
5. Golombek, R., Kittelsen, S., & Haddeland, I. (2011). Climate change: impacts on electricity markets in Western Europe. *Climatic Change*, 113, 357 - 370. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0348-6>.
6. Craig, M., Cohen, S., Macknick, J., Draxl, C., Guerra, O., Sengupta, M., Haupt, S., Hodge, B., & Brancucci, C. (2018). A review of the potential impacts of climate change on bulk power system planning and operations in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.022>.
7. Auffhammer, M., Baylis, P., & Hausman, C. (2017). Climate change is projected to have severe impacts on the frequency and intensity of peak electricity demand across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 1886 - 1891. <https://doi.org/10.1073/pnas.1613193114>.
8. Franco, G., & Sanstad, A. (2008). Climate change and electricity demand in California. *Climatic Change*, 87, 139-151. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9364-y>.
9. Steinberg, D., Mignone, B., Macknick, J., Sun, Y., Eurek, K., Badger, A., Livneh, B., & Averyt, K. (2020). Decomposing supply-side and demand-side impacts of climate change on the US

- electricity system through 2050. *Climatic Change*, 158, 125-139. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02506-6>.
10. Grauers, A. (1996). Efficiency of three wind energy generator systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11, 650-657. <https://doi.org/10.1109/60.537038>.
 11. Karakasis, N., Tsioumas, E., Jabbour, N., Bazzi, A., & Mademlis, C. (2019). Optimal Efficiency Control in a Wind System With Doubly Fed Induction Generator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34, 356-368. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2823481>.
 12. Mesemanolis, A., Mademlis, C., & Kioskeridis, I. (2012). High-Efficiency Control for a Wind Energy Conversion System With Induction Generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27, 958-967. <https://doi.org/10.1109/TEC.2012.2213602>.
 13. Jang, H., Kim, D., Hwang, Y., Paek, I., Kim, S., & Baek, J. (2019). Analysis of Archimedes Spiral Wind Turbine Performance by Simulation and Field Test. *Energies*, 12, 4624. <https://doi.org/10.3390/en12244624>.
 14. Fathy, A., Alharbi, A., Alshammari, S., & Hasanien, H. (2021). Archimedes optimization algorithm based maximum power point tracker for wind energy generation system. *Ain Shams Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.06.032>.

Información de revisión por pares: Revista Biorrefinería agradece a los revisores anónimos por su contribución a la revisión por pares de este trabajo utilizando <https://reviewerlocator.webofscience.com/>.

Acceso abierto: Todos los artículos publicados por Revista Biorrefinería son accesibles en línea de forma gratuita y permanente inmediatamente después de su publicación, sin cargos de suscripción ni barreras de registro.

Nota del Editor: Revista Biorrefinería se mantiene neutral con respecto a reclamos jurisdiccionales en mapas publicados y afiliaciones institucionales.

Copyright: © 2024 por los autores. Presentado para posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).