

Diseño de un método para el Análisis Energético y de Bonos de Carbono por la Generación de energía Eólica en México

SABAS-SEGURA, José*† y SALAZAR-PEREIRA, Martín.

*Instituto Tecnológico Superior de Abasolo, Coordinación de Energías Renovables.
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, División de Ingeniería Mecatrónica e Industrial*

Recibido Octubre 3, 2016; Aceptado Noviembre 8, 2016

Resumen

México por su situación geográfica y su extensión territorial puede implementar plantas de energías renovables, el uso de energías alternas trae como beneficio el dejar de emitir a la atmosfera toneladas de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero. En el presente trabajo se diseña un método para determinar el potencial eléctrico en la región de La Ventosa en Oaxaca. Al usar como base las ecuaciones de sustentación aerodinámica se crea un método teórico con el cual se establecen las condiciones de potencia estimada para una turbina eólica, para determinar la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, así como las ganancias económicas por la venta de bonos de carbono debido a las toneladas de dióxido de carbono evitadas.

Bonos de carbono, energía Eólica, parque eólico potencia de un aerogenerador

Abstract

Mexico for its geographical location and territorial extension can implement renewable energy plants, the use of alternative energies brings the stop issuing benefit to the atmosphere tons of carbon dioxide and other greenhouse gases. In this paper a method is designed to determine the electrical potential in the region of La Ventosa in Oaxaca. When using as a basis the equations of aerodynamic lift a theoretical method with which power conditions estimated for a wind turbine are set to determine the reduction in the emission of greenhouse gases, as well as the economic gains from the sale is created carbon credits due to the tons of avoided carbon dioxide.

Carbon Bonds, Wind Power, Wind Farm, Wind Turbine Power

Citación: SABAS-SEGURA, José y SALAZAR-PEREIRA, Martín. Diseño de un método para el Análisis Energético y de Bonos de Carbono por la Generación de energía Eólica en México. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-9:29-36

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jose.sabas@tecabasolo.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

En el análisis de la energía eólica no solo son importantes los estudios sobre potencia y eficiencia de los aerogeneradores, también resulta de interés los análisis económicos, esto es debido a la creciente demanda por mayores energéticos y de reducir su costo tanto en México como en el mundo. Es importante comprender sobre los retos para hacer eficiente el uso de energía eólica, dentro de los cuales destaca el poder conseguir un costo de kilowatt por hora competitivo en comparación con otras fuentes de energía, para de esta manera tener una mejor eficiencia en el precio comparado con el rendimiento.

Existen diferentes tipos de turbinas eólicas, que varían en tamaño, forma, número de hélices y como resultado se tienen diferentes potencias. Cada fabricante de turbinas eólicas tienen su propio estándar sobre la potencia y velocidad que sus aerogeneradores pueden admitir, algunos proveedores muestran las tablas de eficiencia de cada uno de sus modelos, es fundamental entender cómo funcionan cada turbinas con la que se trabaja para obtener mejores beneficios y establecer las estrategias de control adecuadas para la operación de los aerogeneradores.

El desarrollo e implementación de la energía eólica propone una nueva oportunidad a la humanidad, debido que se evita la dependencia a los combustibles fósiles y como consecuencia se tiene la reducción de gases de efecto invernadero. Este concepto representa una de las claves para que los estudiantes comprendan la importancia de las energías renovables.

Análisis para la instalación de un parque eólico

En la instalación de un parque eólico se debe realizar un estudio de los vientos en la zona donde se ubicará, para ello se debe recurrir a datos proporcionados por institutos, organismos o ministerios que hayan realizado mediciones con anterioridad en la zona, en caso de no existir reportes previos se debe realizar un análisis desde cero. En la figura 1 se muestra un histograma de viento con las mediciones anuales de Oaxaca, (Jaramillo *et al*, 2004).

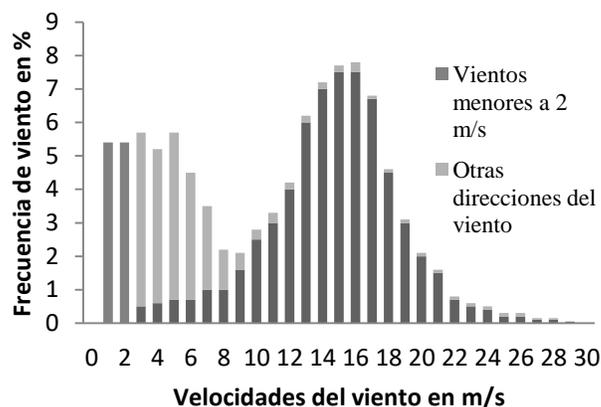


Gráfico 1 Histograma de frecuencia del viento para Oaxaca (Jaramillo *et al*, 2004).

En los datos mostrados por O.A. Jaramillo y M.A. Borja (2004) en su histograma de viento, resulta importante la dirección de los vientos predominantes, estos se localizan con dirección noroeste, con esta dato es posible orientar los aerogeneradores dentro parque.

La frecuencia del viento y el tipo de vientos mostrados en la Figura 1 indica la fuerza y dirección donde se registran predominantemente los vientos en la zona.

Existen ciertas limitantes en la operación de los aerogeneradores, por lo cual hay rangos establecidas para las velocidades, con ello se mejora la conversión de energía.

En el caso de Oaxaca (Jaramillo *et al*, 2004) el tipo de velocidades del viento son altas, que correspondiendo a un rango desde los 10 m/s a los 17 m/s. Estas mediciones permiten estimar el potencial eólico en la zona.

Potencia de un aerogenerador

Existen softwares comerciales para el cálculo de potencia en un aerogenerador, pero este cálculo también puede realizarse de manera sencilla con el método desarrollado a continuación. La potencia de un aerogenerador de cualquier tamaño se puede deducir conociendo la velocidad promedio del viento, así como el diámetro del rotor, por lo tanto se aplica la fórmula 1 (Tong, 2010).

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (1)$$

Donde, P es la potencia del aerogenerador en watts, ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , A es el área que corresponde al rotor, v es la velocidad y C_p el coeficiente de potencia. El valor de la densidad varía debido al cambio en la temperatura ambiente; otros valores de las fórmulas corresponden a los valores del coeficiente de potencia C_p que tiene un valor de $16/27$, correspondiente al límite de Betz (Parracudras, 2001). Así mismo el C_p se considera como un valor que varía dependiendo de las velocidades del viento, esto se puede apreciar en los datos ofrecidos por los fabricantes de aerogeneradores, en el caso de un aerogenerador ENERCON E-126, figura 2, se puede observar esto.

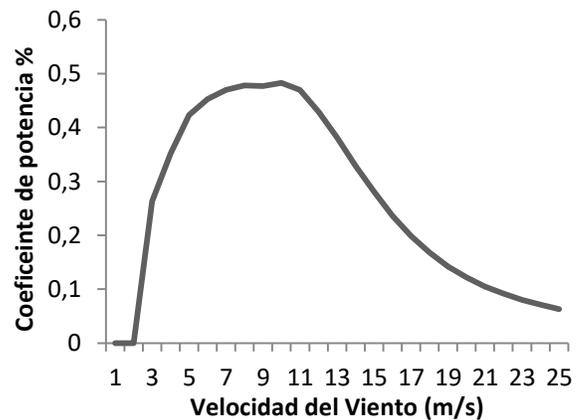


Gráfico 2 Coeficientes de potencia de un aerogenerador ENERCON E-126

Con el cálculo mostrado se concluye que las diferencias del cálculo de potencia entre éstos y el método son ínfimas ($\pm 3\%$) (Berrutti, 2010).

Diseño de un parque eólico

Hay diferentes maneras para acomodar aerogeneradores dentro de un parque eólico, se debe tener en cuenta que cuando el viento atraviesa las turbinas de los aerogeneradores, este tiende a reducir su velocidad, por tanto en la siguiente turbina el viento llegará con menor fuerza; para reducir este efecto se sugiere se debe sugerir a los estudiantes que se utilice el acomodo que se encuentra en la figura 1, la cual muestra un espaciamiento óptimo entre turbinas.

El viento al cruzar por el aerogenerador entrega parte de su energía, por lo cual disminuye su presión y se expande luego de atravesar completamente por el aerogenerador, el viento que no interactuó con la turbina más el resultado de la interacción, se juntan y se comprimen; esta nueva estela de baja la presión de viento hasta nivelarlo con la presión ambiente, cuando se tiene esta condición nuevamente puede ingresar a una siguiente turbina eólica, a esto se le llama viento recuperado (Enriquez-Harper, 2011)

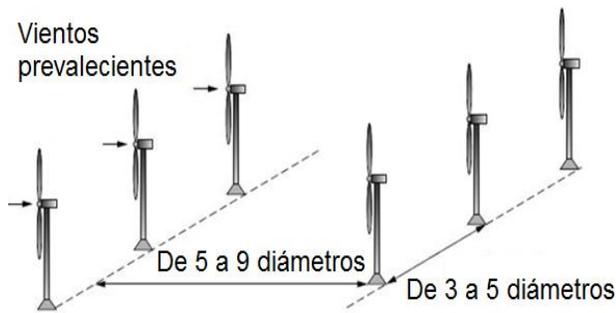


Figura 1 Espaciamiento óptimo de las torres se estima en 3-5 diámetros entre las turbinas de viento entre una fila y 5-9 diámetros entre filas (Zobaa et al, 2011)

Una mejora significativa en el uso de granjas eólicas es preparar el terreno para así aprovechar al máximo el recurso del viento, por ello resulta importante usar terrenos planos para la instalación de estos parques, de esta forma resulta crucial la información empírica recogida por los pobladores de una región en particular, para conocer las zonas donde la intensidad del viento es adecuada para una instalación de este tipo. Se lograrán muchos mejores resultados si el emplazamiento del sistema eólico corresponde a un análisis riguroso de información meteorológica del lugar en estudio, para así dimensionar correctamente el equipo comercial que mejor se acomode a una necesidad energética (SEMARNAT, 2015).

El lugar que se elige para hacer el análisis es la venta Oaxaca, debido a sus altas velocidades que alcanza el viento, como se puede observar en el histograma mostrado en la Figura 1, además ese histograma muestra la orientación geográfica que debe tener el parque eólico. También se debe realizar un estudio sobre el recurso eólico mes con mes para poder determinar el potencial máximo de la zona. Las mediciones hechas por Jaramillo O.A., Borja M.A (2004) muestran las lecturas tomadas mes con mes y se señala la velocidad del viento, esto se observan en la Figura 4.

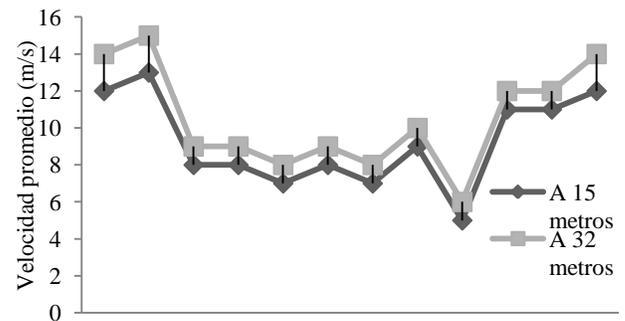


Gráfico 3 Promedio mensual de la velocidad del viento en la estación La Venta (Jaramillo et al, 2004).

En el gráfico 3 es posible observar un comportamiento diferente del viento a alturas variadas, la línea que se encuentra más arriba corresponde a mediciones realizadas a 32 m de altura, contra la línea de abajo que corresponde a 15 m de altura. El cambio de velocidad del viento a diferentes alturas corresponde a un factor conocido rugosidad por el tipo de terreno. Para calcular la potencia total por mes del parque eólico se usan los valores de la velocidad del gráfico de la Figura 4, como se observa se tiene dos curvas y por tratarse de un aerogenerador de grandes dimensiones, se sugiere usar los valores tomados a 32 m de altura cuando se trate de aerogeneradores de grandes dimensiones.

Análisis costo beneficio de la energía eólica

Uno de los principales factores que ha impulsado el desarrollo de energías limpias es el aumento considerable en los costos de producción de los combustibles de origen fósil. De acuerdo con datos de la SENER (2013) el precio de estimado del gas LP se encuentra en aproximadamente 14.27 pesos por litro de acuerdo con los datos del mes de enero de 2015, aunado a la liberación del precio ha hecho que en los últimos años su precio este fluctuando.

De acuerdo con la SENER se espera que en 2015 el precio del gas empiece a reducir (SENER, 2013), pero es un hecho que el uso de combustibles fósiles y su paulatino agotamiento traerá como consecuencia el aumento de los precios. Como consecuencia del aumento en los precios del gas, la generación eléctrica se verá afectada, generando aumentos en su producción.

Para revertir estos efectos en los costos de la producción eléctrica así como para evitar el daño al medio ambiente se han desarrollado nuevos parques de energía renovable en especial de la energía eólica. Año con año varios países a nivel mundial hacen esfuerzos por invertir en energías renovables con el fin de eliminar la dependencia al petróleo. En el caso de México el gobierno federal tiene como meta producir 35% de la energía eléctrica a partir de fuentes de energías renovables para el año 2027 (SENER, 2013), esto se lograra a medida en que se integre a las empresas y estados del país en proyectos de este tipo, así como se mejoren los marcos jurídicos en la ley de promoción de las energías renovables y de aprovechamiento de las energías renovables (AMDEE, 2014).

El costo de instalación de un parque como el que propuso es de varios millones, por poner un ejemplo un solo un aerogenerador ENERCON E-126 tiene un costo de 14 millones de dólares más costos de instalación que incluyen el tendido eléctrico, transformadores, equipo auxiliar para el manejo y operación del parque eólico.

Si se pone en perspectiva el uso de energía eléctrica debida a un parque eólico en comparación con las plantas carboeléctricas o termoeléctricas de tipo ciclo combinado es posible encontrar que se generan grandes ahorros en la emisión de gases de efecto invernadero tales como el dióxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno entre otros esto es debido a que cada kWh de electricidad producida generada por energía eólica en lugar de carbón evita: 0.60 kg de CO₂, (Dióxido de carbono), 1.33 g de SO₂ (Dióxido de azufre) y 1.67 g de NO_x, (Óxidos de nitrógeno).

Estos datos (SEMARNAT, 2004) tales como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno se pueden cambiar por equivalencias en dióxido de carbono, con los datos mostrados en la Tabla 1 se puede hacer esto. Cabe resaltar que los datos contenidos en el Cuadro 1 se encuentran en megagramos.

Contaminante	Conversión	Unidades
NO_x	310	Mg dióxido de carbono equivalente
SO₂	0.031250	Mg acidificación de potencial equivalente

Tabla 1 Indicadores de emisión de la contaminación atmosférica (De-Leeuw, 2002)

Con estos datos es posible hacer un análisis en de cuantos contaminantes se evitan emitir a la atmosfera por el uso de la energía eólica. Por otro lado el dióxido de azufre (SO₂) no se considera como un equivalente directo del CO₂, debido que tiene un nivel bajo de acidificación, razón por la cual no se puede convertir para obtener un beneficio económico del mismo.

Mercado de bonos de carbono

Los bonos de carbono son una iniciativa que nace al alero del protocolo de Kyoto y en el cual se tiene por principal objetivo reducir el CO₂ del planeta. Esto quiere decir que las empresas y/o industrias que producen este gas, deben disminuir sus emisiones o no pasarse del límite permitido a cada país (límite que debe ser repartido para cada empresa y/o industria según lo estime el gobierno de ese país), logrando esto a través de la búsqueda de proyectos implementados en su propio territorio o en otros países en vías de desarrollo, lo cual contaría como un proyecto dentro de su territorio, ya que se dice que la atmósfera es una sola (SEMARNAT, 2015)

Los bonos de carbono se presentan a los estudiantes como una forma de obtener ganancias a través de la venta de contaminantes de CO₂ evitados, para con ello generar una conciencia de cómo se pueden obtener beneficios.

El nombre de “bonos de carbono” se ha dado como un nombre genérico a un conjunto de instrumentos que pueden generarse por diversas actividades de reducción de emisiones, entre estas actividades se tiene: Certificados de Reducción de Emisiones (CERs), Montos Asignados Anualmente (AAUs), Unidades de Reducción de Emisiones (ERUs), Unidades de Remoción de Emisiones (RMUs), Certificados de Reducción de Emisiones (CER).

Las opciones más comunes para la compra de bonos de carbono son: (i) **Compras Spot**: El precio del bono y la cantidad de bonos se acuerdan en la fecha del acuerdo de compra-venta pero la entrega y el pago del bono se realizan en una fecha futura cercana. Se puede considerar como si la compra-venta ocurriera en el momento, aunque pasen unos días entre el pago y la entrega.

Esto se hace para asegurar un precio conveniente para ambas partes y para reducir el riesgo de que el bono no se venda en el futuro (SEMARNAT, 2015) y, (ii) **Contratos de entrega futura**: Se acuerda la compra-venta de una cantidad específica de bonos al precio de mercado actual, pero el pago y la entrega se realizarán en fechas futuras, generalmente de acuerdo a un cierto calendario de entregas (SEMARNAT, 2015).

Finalmente el precio de los bonos de carbono son por tonelada y la cotización es en euros por tanto al realizar este análisis será necesario trasladar los watts a kilowatts para obtener los kilogramos de CO₂, convertir los óxidos de nitrógeno (NO_x) a CO₂ equivalentes sumar los valores y multiplicar valor a toneladas por su precio en euros y hacer la conversión a pesos mexicanos.

Metodología utilizada

Lo primero a calcular es la potencia, para ello se usa la ecuación 1, con este valor se debe obtener los kilowatts hora por día por tanto la potencia, este valor cambiara de acuerdo al mes esto debido a la velocidad promedio del mismo, por tanto modificando el coeficiente de potencia según la velocidad, por ejemplo para el caso del mes de enero se reemplaza un valor de velocidad de 14 m/s y un valor de c_p de 0.33 correspondiente a este dato (observado en la figura 2).

Obtenida la potencia, esta se multiplica por 24 horas, así como por número de aerogeneradores instalados en el parque eólico, este ultimo dato se multiplica por el número de días que tiene cada mes, así se obtiene la potencia de un aerogenerador por mes. El valor de cada mes se suma para obtener el total por un año.

Obtenida la potencia total, con el uso de la tabla 1, se transforma a toneladas de sustancias evitadas a la atmosfera tanto de CO₂, SO₂ y NO_x, así como la conversión de estas dos últimas sustancias CO₂ equivalente. Se realizarón dos sumas de equivalencias de CO₂, una considerando al SO₂ y la otra sin considerarlo. Finalmente se hace el tipo de cambio por la venta de bonos.

Resultados

Para analizar la metodología se propone un ejemplo de granja eólica considerando 12 aerogeneradores del modelo ENERCON E-126 (cuyo diámetro es de 127 m), así como los valores de velocidades del viento para La Venta Oaxaca (figura 4) y los coeficientes de potencia del aerogenerador propuesto (figura 2), con esos datos se construye la tabla 2, observándose una potencia de anual aproximada de 430.12 GWh

Mes	Potencia total estimada de la granja eólica por mes (kWh)
Enero	62,496,000
Febrero	59,270,400
Marzo	24,105,600
Abril	23,328,000
Mayo	16,963,200
Junio	23,328,000
Julio	16,963,200
Agosto	33,480,000
Septiembre	6,566,400
Octubre	51,336,000
Noviembre	49,680,000
Diciembre	62,496,000
Suma anual estimada	430,012,800 430.12 GWh

Tabla 2. Estimación de la potencia por mes y anual para una granja de 12 aerogeneradores ENERCON E-126.

Se considera el precio de los bonos para el mes de agosto de 2016 que tiene un valor de 4.88€, así como una tasa de cambio de un euro es igual a 20.46 pesos para el mismo mes. Al introducir estos datos dentro de la metodología se obtiene una cantidad de 47 millones 994 mil 838.9 pesos de ganancia por venta de bonos de carbono, los datos obtenidos se pueden ver en la tabla 3.

Sustancia	Total de sustancias contaminantes (Ton)	Equivalencia en CO ₂ de las sustancias (Ton)
CO ₂	258 076.8	258 076.8
SO ₂	571.9170	17.872407
NO _x	718.1211	222,617.627
Total de equivalencia de CO₂		480,712.299
Total de equivalencia sin incluir al SO₂		480,694.427
Valor de la venta de bonos de carbono		\$ 47,994,838.9

Tabla 3. Cálculo de contaminantes que se puede evitar por la instalación de la granja eólica propuesta y ganancia por bonos de carbono.

Conclusiones

Para el estudio de la granja eólica se tomaron las formulas de la potencia eléctrica de un aerogenerador, los efectos y las fuerzas del viento, así como las mediciones y datos estadísticos previamente realizadas en la venta Oaxaca, que aportaron datos para el estudio de la instalación de una granja eólica, con ello se creó una herramienta con la cual fue posible determinar el potencial eléctrico de la zona para la instalación de un parque con 12 turbinas ENERCON E-126.

Una vez encontrada la potencia prevista, se procedió a cambiar dicho valor por el equivalente en emisiones evitadas de dióxido de carbono y de óxidos nitrosos, con el valor en toneladas se cambió por el valor de venta, que mostró una ganancia que se analizó de dos maneras distintas, los certificados CER y las ventas Spot. Las ventas Spot mostraron una mayor ganancia de venta, además en comparación con los CER pero en base a las ventajas de un esquema u otro se pueden decidir cuál resulta mejor considerando las necesidades inmediatas o futuras que existan.

Las ventas de bonos de carbono mostraron ser una atractiva opción de venta, así como una opción de ganancia extra sobre la generación de electricidad, mediante el uso de energía eólica. Es importante resaltar que el futuro para la energía eólica en México muestra que aún falta mucho por hacer. Las perspectivas de instalación futura basados en las mediciones existentes señalan que el potencial de instalación eólica que aún no está del todo explotado este recurso.

Una sugerencia futura es de resaltar que se tendrán mejores beneficios, recursos y subsidios cuando se trata de proyectos completamente renovables. Este trabajo de investigación podría ser complementado si se introducen dos o más energías renovables al estudio, constituyendo un sistema híbrido, así como añadiendo la legislación necesaria sobre el uso de energías alternas, incluyendo un estudio de inversión mediante la aplicación de los créditos verdes.

Referencias

Big Stone Renewables LLC. 2015. Wind Energy. <http://bigstonerenewables.com/>. (Consulta: mayo 15 de 2015).

Jaramillo O.A., Borja M.A. 2004. Wind Speed Analysis in La Ventosa México: a bimodal probability distribution case, *Renewable Energy* 29:1613-1630.

W. TONG, Kollmorgen. 2010. Wind Power Generation and Wind Turbine Design. *Electricity Generation from Wind Energy*. Willey Press. 1:1-14.

Alejandro Parra-Cuadras. 2001. Evaluación del Potencial Eólico y su Aplicación a Sistemas de Bombeo. IPN, México.

Fernando Berrutti. 2010. Modelado y control de turbinas de aerogeneradores de velocidad variable. IEEE, 8° Encuentro de especialistas en Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas. Montevideo, Uruguay.

Gilberto Enriquez-Harper. 2011. El ABC de las instalaciones eléctrica en sistemas eólicos y fotovoltaicos. *Limusa*. 4:193-290.

Ahmed F. Zobaa. 2011. Ramesh C. Bansal Handbook of Renewable Energy Technology. Ed. World Scientific.

SEMARNAT. 2015. Cambio climático. El mercado de los bonos de carbono. http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/sectprivcc/mercado_bonoscarbono.html. (consulta: mayo de 2015)

SENER 2013. Iniciativa Para el Desarrollo de las Energías Renovables En México, Energía Eólica.

AMDEE. 2014. Emisiones evitadas por la energía eólica. <http://www.amdee.org/>. (Consulta: julio 10 de 2014).

SEMARNAT. 2004. Integración del inventario de Emisiones de fuentes fijas. Querétaro, México.

Conversion factors from: De-Leeuw, F.A.A.M. (2002). A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution. *Environmental Science & Policy*, TOFP: Tropospheric Ozone Forming Potentials. 5:135-145.