

## Energía eólica / Evaluación del recurso eólico

Chávez Bartolo Julieta Janeth<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Estudiante de física en facultad de ciencias, UNAM. Ciudad de México, México.\*Corresponding author: [julietajaneth@ciencias.unam.mx](mailto:julietajaneth@ciencias.unam.mx)

## KEYWORDS

Curva de Potencia  
Energía anual producida  
Weibull**ABSTRACT** Por medio de un estudio estadístico y probabilístico utilizando una distribución Weibull es que pudimos determinar la energía anual producida de un aerogenerador Vestas 2MW determinando que tuvo una eficiencia del 0.7% no resultando un negocio rentable.

© The Author 2021.

Energía eólica / Evaluación del  
recurso eólico

SUBMITTED 6 Month 2021

REVISED 7 Month 2021

ACCEPTED 8 Month 2021

## 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Problema comercial

Actualmente resolver ecuaciones de fluidos para lugares abiertos parece ser una tarea imposible. Por ello la ciencia de datos nos brinda una herramienta poderosísima que está dando grandes resultados en la vida moderna, si bien, no resolveré un método en específico con este trabajo mi objetivo será mostrar lo que es posible lograr con un conjunto de datos de un fluido como es el aire.

Hoy día la producción de energía eólica ya parece ser un negocio viable, pues sus costos han disminuido considerablemente gracias al desarrollo tecnológico y a la implementación de proyectos para la evaluación del recurso.

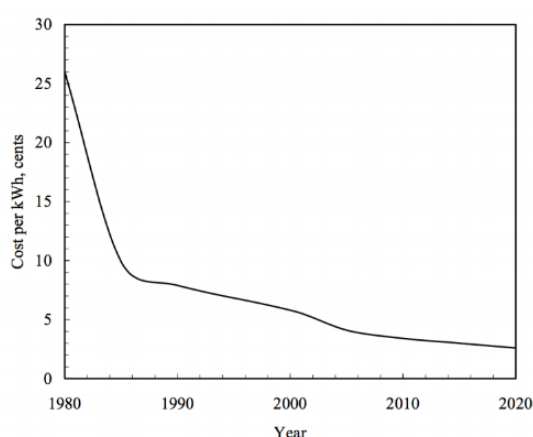


FIGURE 1. Disminución de costes en proyectos de aerogeneradores a lo largo de los años.

Sin embargo el costo de un proyecto de instalación de turbina eólica sigue siendo alto en cualquier sentido, desde la máquina hasta la mano de obra. Por ello es necesaria una correcta evaluación del recurso eólico en la zona antes de aventurarnos a instalar una turbina ya que de no hacerlo

las pérdidas económicas podrían ser devastadoras e irreversibles. En la figura 2 podemos ver los porcentajes de costos como de inversión inicial.

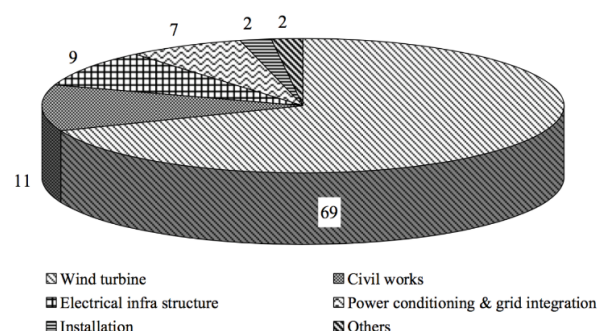


FIGURE 2. Distribución de los costes en proyectos de aerogeneradores.

## 1.1.1 Curva de potencias

El aerogenerador que se elija deberá tener una curva de potencia que encaje con las velocidades de viento del sitio en el que se desee poner el aerogenerador. Ya que por ejemplo, si se omite este paso es posible que gastemos alrededor 20 millones de pesos en la turbina, pero sea inservible para el lugar porque podría ser que las velocidades del sitio nunca sean suficientes para la velocidad de arranque o bien es posible que sean demasiado fuertes como para romperlo, forzando al aerogenerador a estar detenido la mayor parte del tiempo como mecanismo de seguridad. Este es el ejemplo perfecto de cuando se tiene un gran recurso eólico, pero no se puede aprovechar a causa de un mal estudio.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

## 2.1 DATOS

Cuento con datos de un aerogenerador en Illinois (realmente desconozco el lugar del que provienen los datos, así

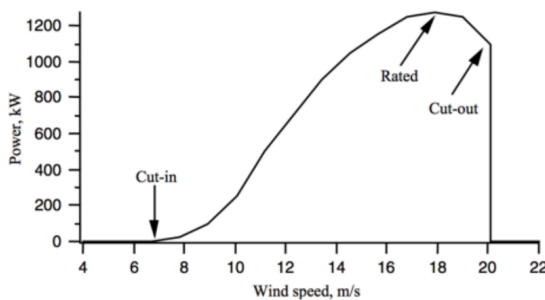


FIGURE 3. Ejemplificación de una curva de potencias de un aerogenerador.

que supongamos (solamente por fines didácticos) que son de EE.UU en el municipio de Buckhart con coordenadas (39.693397, -89.266169)). Con estas coordenadas utilizaré Foursquare para analizar la zona y su distribución geográfica. Los datos del aerogenerados principalmente son de velocidad del viento, a estas velocidades habremos de ajustar una distribución de probabilidad Weibull. Además será necesario para la evaluación la curva de potencia de un aerogenerador, supongamos que el que quisiéramos poner es un modelo Vestas 2MW. Por lo que debemos contar con este archivo, ver figura 10. Lo que nos dice la curva de potencias es la correspondencia teórica que existe entre la velocidad del viento y la potencia que este hecho genera en la turbina.

Podemos observar en la figura 9 que las mediciones de velocidad se realizaron en el invierno, durante el mes de noviembre de 2017. Y se registraron cada 10 segundos, eso nos da 4320 mediciones.

## 2.2 METODOLOGÍA

### 2.2.1 COSTO ANUALIZADO

Después del gasto inicial habrá que tomar en cuenta los costos de operación y mantenimiento, como se explica en la figura 2. Que rondan en el 2% anualmente del costo inicial. Y como el dinero cambia su valor conforme el tiempo avanza, en general se toma una tasa de interés de 5% de la inversión inicial. Por ello es importante traer al presente el costo anualizado, lo cuál lo podemos hacer como:

$$c = \frac{C_I}{8760n} \left( \frac{1}{P_R C_F} \{1 + m[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n}]\} \right) \quad (1)$$

Ya que si  $P_F$  es la potencia nominal de la turbina y  $C_F$  es el factor de capacidad, 8760 la cantidad de horas al año. La energía generada en un año es:

$$8760 P_F C_F$$

$I$  es la tasa de interés y  $n$  es la cantidad de años a estimar.

### 2.2.2 Potencia eólica

El cálculo de la potencia eólica es de vital importancia en la evaluación del recurso eólico.

La energía cinética del viento puede calcularse si se supone que el aire pasa por un cilindro que encierra un área  $A$  a una velocidad de viento  $V$  cuya densidad es  $\rho$ .

$$\rightarrow P = \frac{E_c}{s} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

La densidad de potencia se define como la potencia por unidad de área.  $\frac{P}{A} = [W/m^2]$

Y como es de esperar existen diversas formas de calcular el recurso eólico, esto siempre depende de la precisión y la cantidad de nuestros datos.

### 2.2.3 Uso directo de datos

La densidad de potencia promedio por unidad de área la calculamos como:

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A U_i^3$$

Con  $i$  alguna medición,  $U_i$  la rapidez del viento y  $N$  el total de mediciones. Ahora la densidad de energía por unidad de área en un tiempo  $N\Delta t$ .

$$\bar{E}/A = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A U_i^3 N \Delta t = \frac{\bar{P}}{A} N \Delta t$$

La potencia media del aerogenerador  $\bar{P}_w$  es:

$$\bar{P}_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_w(U_i)$$

Con  $P_w$  es la potencia de salida definida por la curva de potencia del aerogenerador.

Por lo tanto la energía del aerogenerador,  $E_w$ :

$$\Rightarrow E_w = \sum_{i=1}^N P_w(U_i) \Delta t$$

### 2.2.4 Técnicas estadísticas

Para esto antes habrá que elegir una buena función de probabilidad  $p(U)$  que se ajuste a los datos de viento de la localidad y si se cuenta con la curva de potencia del aerogenerador de interés,  $P_w$ , entonces la potencia media,  $\bar{P}_w$ , del aerogenerador será:

$$\bar{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(U) p(U) dU$$

Al histograma de las velocidades del viento se le debe ajustar una distribución que modele nuestros datos, para ello es importante el hecho que usemos la mejor distribución. Usaré una distribución Weibull ampliamente utilizada en el campo, ya que una de sus ventajas es el hecho que inicia en cero, pensando a las "velocidades del viento como positivas" es decir, solamente sus magnitudes, datos que tenemos.

Una variable  $x$  tiene una distribución Weibull si su distribución de probabilidad  $f(x)$  tiene la forma:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} e^{-\left( \frac{x}{\beta} \right)^{\alpha}}$$

con

$$\alpha, \beta, X > 0$$

Con  $X$  la rapidez promedio,  
 $\alpha$  un parámetro de forma,  
y  $\beta$  un parámetro de escala.

## 3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

A continuación vemos gráficamente la diferencia que existe en la velocidad del viento entre una altura de 80m y 40m graficando en su espacio fase.

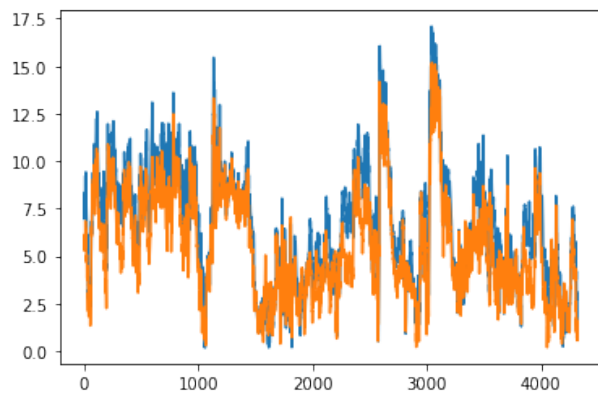


FIGURE 4. Gráficamos la serie temporal para ver cómo varía la velocidad del viento durante ese mes. Observamos que la intensidad parece ser la misma para cada medición, siendo casi siempre mayor a 80m que a 40m.

Podemos decir que la diferencia es importante. Entre más parecidas fueran tendería a una recta identidad.

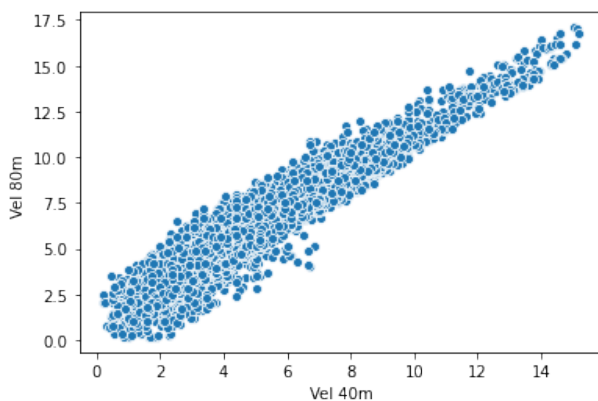


FIGURE 5. Espacio fase de velocidades de viento a 80m que a 40m.

El hacer la rosa de vientos es adecuado para saber la orientación a la que se colocar el aerogenerador, existen mecanismos de orientación en algunos de ellos que se pueden programar para que giren de acuerdo a la mayor probabilidad de viento durante el día o la noche, inclusive por estaciones.

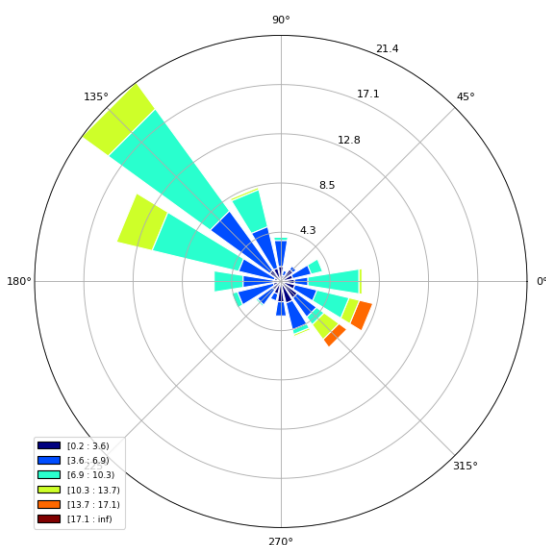


FIGURE 6. Rosa de vientos.

A partir de ver la rosa de vientos, en figura 6, podemos

asegurar que la dirección adecuada para colocar el aerogenerador es a los 135°.

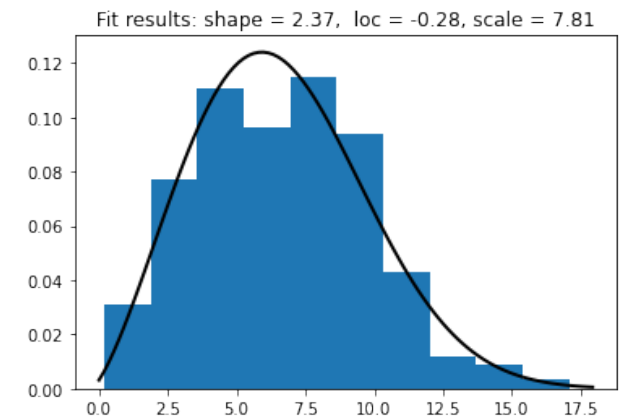


FIGURE 7. Ajustando distribución de probabilidad Weibul al conjunto de velocidades a 80m.

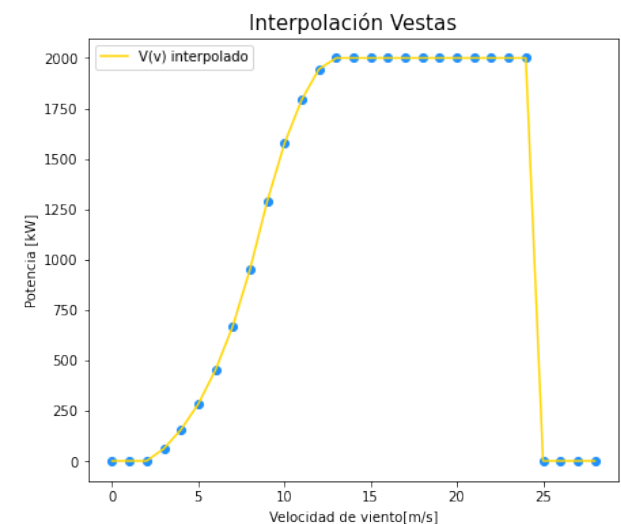


FIGURE 8. A partir de los datos de potencia de un modelo Vestas 2MW, figura 10, interpolamos y obtenemos estos datos más completos.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La vida útil de un aerogenerador suele ser entre 15-30 años. Claro que esto depende del mantenimiento que se le de y de cómo es el tipo de flujo de viento al que esté sometido. Sin embargo, estimaremos a una vida de 20 años. En el caso ideal deberíamos tener medidas durante dos años, sin embargo, no cuento con esos datos. Por lo que para este trabajo supondré un comportamiento parecido a este mes durante el resto del año.

Evaluando nuestra distribución de velocidades con su respectiva potencia del aerogenerador y multiplicando esta potencia mensual por el periodo de tiempo que dura el proyecto es que sabemos que se produce una energía de 127,231,646.556 kW. Pensando en un costo de cada AG 2,200 USD por kW instalado podemos obtener la inversión inicial,  $CI = 4.4$  millones USD, los costes de operación y mantenimiento serán 220,000 USD y sufrirá una devaluación de 19,301,440.43 USD Los costos totales serán la suma de la inversión inicial más los costos de operación y mantenimiento.

$$\text{Costos totales} = 23,701,440.43 \text{ USD}$$

El costo de la energía está dado por:

$$C_E = \frac{\text{Costos totales}}{\text{Energía Anual Producida}}$$

El costo de la energía es 0.18628573214511493 (USD/kWh)

Datos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), señalan que durante enero de 2021, los usuarios estarán pagando 0.843 pesos = 0.041 USD por cada uno de los primeros 75 kilowatts-hora en el rango de consumo básico.

Lo cual dejaría a este aerogenerador una de ganancia de -2.91 pesos = -0.138 USD en México. Esta energía no dejaría ganancias en México.

En hogares en EUA el precio es 0.149 USD por kWh. El precio promedio en el mundo es 0.140 USD por kWh. No habiendo ganancias en EUA y en parte del mercado mundial.

Ahora calculemos la eficiencia que tendría instalar un aerogenerador en este sitio. Para lo cual hay que obtener la densidad de energía como se explica anteriormente que sería la máxima energía a aprovechar teóricamente. Con ello obtenemos la razón respecto a la energía anual producida.

$$\eta = \frac{\text{Energía Anual Producida}}{\text{Energía teórica}}$$

Recordando que el aerogenerador Vestas 2MW tiene un diámetro de 90m.

$$\rightarrow A = \pi 45^2$$

Con esto podemos ver la eficiencia del aerogenerador sigue siendo muy débil. De apenas el 0.7%. Confirmando que poner un aerogenerador en este lugar no es rentable.

#### 4.0.1 Tablas

time	WS_80mA_mean	WS_80mA_stddev	WS_80mB_mean	WS_80mB_stddev	WS_40m_mean
2017-11-01 00:00:00	7.9980	0.81147	8.04410	0.79147	6.00120
2017-11-01 00:10:00	7.5565	0.71261	7.54670	0.68951	5.63460
2017-11-01 00:20:00	7.5254	0.63488	7.49080	0.63107	5.73400
2017-11-01 00:30:00	6.9534	0.61436	6.94360	0.59687	5.29290
2017-					

FIGURE 9. Tabla de datos de velocidades de viento, densidad del aire, potencia entre otras cosas recolectados por un aerogenerador. De tamaño 66 columnas x 4320 renglones.

	Vel [m/s]	Pow[kW]
0	0	0
1	1	0
2	2	0
3	3	61
4	4	156
5	5	283

FIGURE 10. Tabla de datos de la curva de potencias de un aerogenerador modelo Vestas 2MW. De tamaño 2 columnas x 26 renglones.

## 5. CONCLUSIONES

En conclusión al ser este estudio hecho para un lugar en EUA, este aerogenerador no sería competitivo ni mucho

	name	categories	lat	lng
0	Buckhart Tavern	Bar	39.749495	-89.444054
1	Siddens Indoor Shooting Range	Athletics & Sports	39.750225	-89.448746

FIGURE 11. De solicitar los 100 sitios dentro de un radio de 500 metros a través de FourSquare solo obtenemos estos dos.

menos un proyecto rentable. Aconsejo ya sea buscar un lugar con mejores condiciones atmosféricas o bien vender esta energía en otro país. Pero esto no parece posible porque el almacenamiento y transporte de energía suele tener costes muy altos.

Con FourSquare, figura 11, podemos ver que hay un bar y un aparente gimnasio por lo que podríamos deducir que es un lugar concurrido y no un campo abierto, por lo que no sería recomendable instalar un Vestas 2MW, sugiero hacer este estudio con la curva de potencias de un aerogenerador de eje vertical usualmente usados en zonas urbanas.

Es importante tomar en cuenta que solo se tuvieron mediciones durante un mes, bien pudiendo no ser suficiente tiempo para haber estimado el proyecto a 20 años ya que sabemos que el flujo de viento cambia con las estaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Para la elaboración de este trabajo me basé en el curso de energía eólica impartido por el Dr. Oswaldo Rodríguez en el instituto de energías renovables, Morelos, UNAM, quien además me facilitó parte del código en python de este trabajo. Además agradezco el apoyo de Josafat Cordero Silis y Emmanuel Luna Ávila por su apoyo durante la redacción y contenido del proyecto.

## 6. REFERENCIAS

Rodríguez, O. (2013). Renewable Energy. Analysis about sampling, uncertainties and selection of a reliable probabilistic model of wind speed data used on resource assessment. Elsevier. Volúmen 50. 244-252.

Sathyajith, M. (2020). Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer.

Manwell, J. Macgowan, J. Rogers, A. (2009). Wind Energy explained. Theory, design and application. John Wiley Sons, Ltd.

Acervo histórico tarifario. CFE, Comisión Federal de Electricidad. <https://www.cfe.mx/hogar/tarifas/pages/acervo-historico-tarifario.aspx>

Consumo de energía eléctrica (kWh per cápita). Banco Mundial.

<https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.BC>