

Título Análisis de energía eólica en tres escuelas rurales off-grid de la provincia de Jujuy

Tipo de Producto Informe técnico

Autores Gustavo Cambria y Daniel Zambrano

Código del Proyecto y Título del Proyecto

A17T14 - Análisis de velocidad de vientos en la provincia de Jujuy

Responsable del Proyecto

Gustavo Cambria

Línea

Ciencias Agroambientales

Área Temática

Agro-Ambiental

Fecha

Noviembre 2016

INTEC

Instituto de Tecnología

UADE



**PROCESAMIENTO DE DATOS DE VIENTOS
AEROPUERTO INTERNACIONAL GOBERNADOR
HORACIO GUZMÁN, SAN SALVADOR DE JUJUY
PROVINCIA DE JUJUY**

Noviembre 9, 2016



**UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS EXACTAS**

Resumen:

El presente trabajo tiene por finalidad el procesamiento de datos de vientos de la provincia de Jujuy, específicamente los recolectados en el Aeropuerto Internacional Gobernador Horacio Guzmán, ubicado en San Salvador de Jujuy, 24.38 °S, 65.08 °W, a los fines de intentar responder si con los resultados obtenidos a partir de dicho procesamiento de datos es posible analizar la viabilidad técnica de implementación de proyectos de energía eólica en dicha zona de estudio.

En tal sentido, se plantea como hipótesis la utilización de aerogeneradores Marca WINTEC de 1.500 Watt de potencia.

Se procesaron datos de velocidades de vientos promedio diarios de dos años calendario (2013 – 2014).

Como principal conclusión surge que los resultados obtenidos no son concluyentes a los fines de analizar la factibilidad técnica para la instalación de aerogeneradores en la zona estudiada a los fines de obtener energía eléctrica.

Contenidos

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	4
2. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL VIENTO.....	5
2.1. ORIGEN DEL VIENTO.....	5
2.2. VARIACIÓN VERTICAL DEL VIENTO.....	5
2.3. POTENCIA EÓLICA DISPONIBLE.....	5
2.4. EL COEFICIENTE DE POTENCIA C_p	6
2.5. EL LÍMITE DE BETZ.....	7
2.6. MÁXIMA POTENCIA EXTRAÍBLE.....	9
3. OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS DE VIENTO.....	11
3.1. DATOS DE VIENTO OBTENIDOS.....	11
3.2. RUGOSIDAD.....	11
3.3. DISTRIBUCIÓN WEIBULL DE PROBABILIDAD DE VELOCIDADES.....	12
4. METODOLOGÍA DESARROLLADA.....	13
5. CONCLUSIONES.....	16
6. BIBLIOGRAFÍA.....	17
7. LISTADO DE ANEXOS.....	17

1. Introducción y objetivos.

La provincia de Jujuy se encuentra situada en la Región del Norte Grande Argentino. Limita al norte con Bolivia, al oeste con Chile, al este y al sur con la provincia de Salta.

En cuanto a su geografía, se divide en tres grandes regiones:

- La Quebrada de Humahuaca.
- El altiplano.
- Los Valles orientales.

Las altitudes van desde los 6000 msnm a los 500 msnm, las mayores altitudes se ubican en la Cordillera de los Andes.

Al sur de la provincia se encuentra la región de El altiplano. En los Andes el clima es el frío debido a la altura, y en el valle de Jujuy el clima es meso térmico con días fríos y nevadas en invierno, en las zonas bajas de El Ramal predomina durante todo el año un clima cálido tropical bastante húmedo.

Considerando el objetivo del presente trabajo, se estableció como zona de estudio la Capital de la Provincia, San Salvador de Jujuy.

Los datos de vientos para el presente trabajo se obtuvieron de la base de datos del sitio de Internet Weather Underground (2015). Se tomaron datos de promedios diarios durante 2 (DOS) años consecutivos (período 2013-2014).

El procesamiento de estos datos de vientos permitirá obtener una serie de resultados con los que se pretenderá definir si los mismos son concluyentes o no para analizar la viabilidad técnica de implementar energía eólica en la zona de estudio.

2. Aprovechamiento energético del viento.

2.1. Origen del viento.

El origen del viento se debe principalmente al movimiento de las masas de aire que se encuentran en la atmósfera. Para el estudio e implementación de parques eólicos los vientos de mayor interés serán aquellos que se producen a nivel de la superficie terrestre, ya que son los vientos que contienen la energía que se desea aprovechar.

Estos movimientos de masas de aire a su vez son originados por gradientes de presión, los cuales se producen principalmente por los gradientes térmicos que a su vez tienen su origen en la radiación solar que recibe la tierra. Es decir, los movimientos de masas de aire y por ende los vientos que se producen tanto en la atmósfera como en la superficie terrestre son causados por la interacción tierra-sol.

2.2. Variación vertical del viento.

Existen diversos factores que afectan la velocidad del viento a diferentes alturas de la superficie terrestre. Entre ellos el más importante es el gradiente de temperatura, es decir la estabilidad atmosférica. En la práctica, a los fines de poder determinar la velocidad del viento a una cierta altura (z') se suele suponer atmósfera neutra y utilizar la ecuación (1); donde a partir de la medición de una velocidad de referencia $V(z)$ y conociendo la longitud de rugosidad del terreno (z_0) se puede obtener la velocidad del viento a la altura deseada $V(z')$.

$$V(z') = V(z) \cdot \frac{\ln(z') - \ln(z_0)}{\ln(z) - \ln(z_0)} \quad (1)$$

2.3. Potencia eólica disponible.

La energía cinética contenida en una masa de aire en movimiento está dada por la siguiente expresión:

$$E = 1/2 \cdot m \cdot v^2 \quad (2)$$

Esta energía por unidad de volumen será:

$$E=1/2 \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3)$$

Siendo ρ la densidad del aire, que a efectos prácticos puede suponerse prácticamente constante.

El flujo de aire que atraviesa una superficie es:

$$\Phi = v \cdot A \quad (4)$$

La potencia eólica en una sección A , perpendicular a la corriente de aire que fluye con velocidad v , será la energía por unidad de tiempo; es decir:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot v \cdot A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (5)$$

Por lo tanto, de las ecuaciones anteriores, se puede deducir que la potencia disponible en las masas de aire en movimiento, es decir, la potencia contenida en el viento es directamente proporcional a la densidad, al área perpendicular y al cubo de la velocidad.

2.4.El coeficiente de potencia C_p

El coeficiente de potencia de un aerogenerador está definido como la fracción de potencia que contiene una masa de aire en movimiento, o sea el viento, y que es realmente capturada por el aerogenerador. Es una medida de la eficiencia del aerogenerador.

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad (6)$$

Donde:

P_d : potencia disponible

ρ : densidad del viento

A : área expuesta al viento incidente

V : velocidad del viento incidente.

El valor del coeficiente de potencia nunca puede alcanzar el 100% respecto a la potencia incidente. El valor máximo que puede alcanzar el coeficiente de potencia fue determinado por Albert Betz, en la década de 1920 a partir de la aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento.

2.5.El límite de Betz

Para poder realizar el desarrollo del límite de Betz a los fines de obtener la máxima potencia aprovechable de una masa de aire en movimiento, es imprescindible en una primera instancia plantear la teoría de Cantidad de Movimiento y exponer una serie de hipótesis simplificadoras, en este caso, las Hipótesis de Rankine y Froude, que son:

- El aire será considerado como un fluido ideal sin viscosidad en todo el campo de estudio excepto en las proximidades del rotor.
- El fluido será considerado incompresible y la velocidad del viento será subsónica, por tanto, la densidad se considera constante.
- Se considerará régimen estacionario.
- No será considerada la velocidad de giro del rotor ni la de su estela.
- Se considera al rotor como un disco poroso fijo, compuesto por infinitas palas de espesor despreciable.

Las ecuaciones que se aplican en la deducción del límite de Betz son:

a) Ecuación de continuidad

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (7)$$

b) Gasto másico

$$G = \rho \cdot A \cdot v \quad (8)$$

c) Fuerza sobre el rotor

$$F = G \cdot \Delta v = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (9)$$

$$F = A \cdot (P_+ - P_-) \quad (10)$$

d) Ecuación de Bernouilli

i. Entre A_1 y la sección anterior del disco

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_+ + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (11)$$

ii. Entre la sección posterior del tubo y A_2

$$p_- + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad (12)$$

e) Presiones

$$p_1 = p_2 \quad (13)$$

Despejando p_1 de (11) y p_2 de (12), y reemplazando ambos en (13) obtenemos:

$$p_+ - p_- = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (14)$$

La fuerza sobre el rotor será:

$$F = A \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) \right] \quad (15)$$

La velocidad del aire que circula a través del rotor eólico (V) es exactamente la media aritmética entre las velocidades de entrada (V_1) y de salida (V_2), es decir:

$$v = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \quad (16)$$

La potencia absorbida por el rotor será el producto de la fuerza ejercida por el viento sobre el rotor por la velocidad del fluido en el rotor.

$$P = F \cdot v \quad (17)$$

$$P = A \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2)$$

Reordenando:

$$P = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \right] \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \right] \quad (18)$$

Donde:

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2)$ es el gasto másico a través del rotor y $\frac{1}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2)$ es la pérdida de energía cinética por unidad de masa de viento entre las secciones 1 y 2. (MURAMADA, 1999).

2.6. Máxima potencia extraíble

De las deducciones anteriores se puede observar que la potencia depende del área del rotor y de las velocidades de viento aguas arriba y aguas abajo del rotor. Sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente, para conocer la máxima potencia aprovechable es necesario primero conocer el valor del coeficiente de potencia obtenido por Betz en el año 1926. Por un lado V_1 corresponderá a la velocidad de viento incidente, y por otro lado se define:

$$k = \frac{v_2}{v_1} \quad (19)$$

Reemplazando en la expresión de la potencia obtendremos:

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot (1 + k) \cdot (1 - k^2) \quad (20)$$

Para obtener P máxima derivaremos respecto a k e igualaremos a cero:

$$\frac{dP}{dk} = 0$$

Se llega a la ecuación de segundo grado $3 \cdot k^2 + 2 \cdot k - 1 = 0$, que resolviendo, y tomando la solución positiva, se llega a $k = \frac{1}{3}$.

Sustituyendo en la expresión de la potencia se obtiene:

$$P_{max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (21)$$

Sustituyendo en la expresión del coeficiente de potencia, se llega a una expresión para C_p :

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot (1 + k) \cdot (1 - k^2) \quad (22)$$

Representando gráficamente esta expresión en función de k , se tiene la siguiente gráfica:

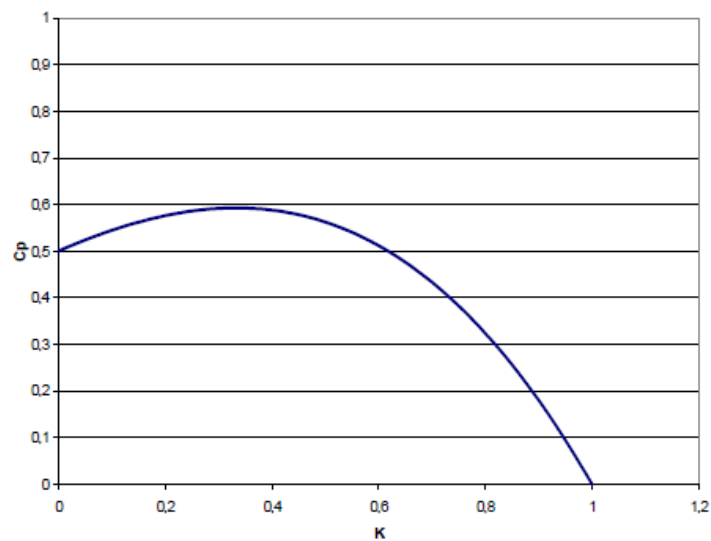


Gráfico 1: coeficiente de potencia K. (MUR AMADA, 1999).

Dicha gráfica presenta un máximo en las proximidades de 0.6. Dándole valores numéricos se obtiene:

$$C_{pmax} = \frac{\frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} \quad (23)$$

Por lo tanto:

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0,5925 \quad (24)$$
$$C_{pmax} = 59,25\%$$

De esta manera, vemos que como máximo sólo puede extraerse el 59,25% de la energía cinética que contiene una masa de aire en movimiento. Este es el valor del coeficiente de potencia máximo hallado por Albert Betz en 1926.

3. Obtención y tratamiento de datos de viento.

3.1. Datos de viento obtenidos.

Los datos de vientos para el presente trabajo se obtuvieron de la base de datos del sitio de Internet Weather Underground (2015). Se tomaron datos de promedios diarios durante 2 (DOS) años consecutivos (período 2013-2014).

3.2. Rugosidad.

Las velocidades del viento en las capas más bajas de la atmósfera se ven afectadas por la fricción con la superficie terrestre. En la industria eólica se distingue entre rugosidad del terreno, la influencia de los obstáculos, y la influencia del contorno del terreno, también llamada orografía del área.

A los fines del presente trabajo la rugosidad del terreno se considera 0,0024 dado que son datos del Aeropuerto Internacional Gobernador Horacio Guzmán.

Tabla I: rugosidad. (Atlas Eólico, 2015)

Tabla de clases y longitudes de rugosidad			
Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad z_0 (m)	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos
Definiciones de acuerdo con el Atlas Eólico Europeo, WAsP.			

3.3. Distribución Weibull de probabilidad de velocidades.

La variación del viento en un emplazamiento típico suele describirse utilizando la llamada Distribución de Weibull. El área bajo la curva siempre vale exactamente 1, ya que la probabilidad de que el viento sople a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100%.

Para el presente trabajo, a los fines de conocer la distribución de probabilidad de velocidades, se utilizó el software proporcionado por la “Asociación de la Industria Eólica Danesa”.

A continuación se presenta la gráfica obtenida con el software mencionado ut supra:

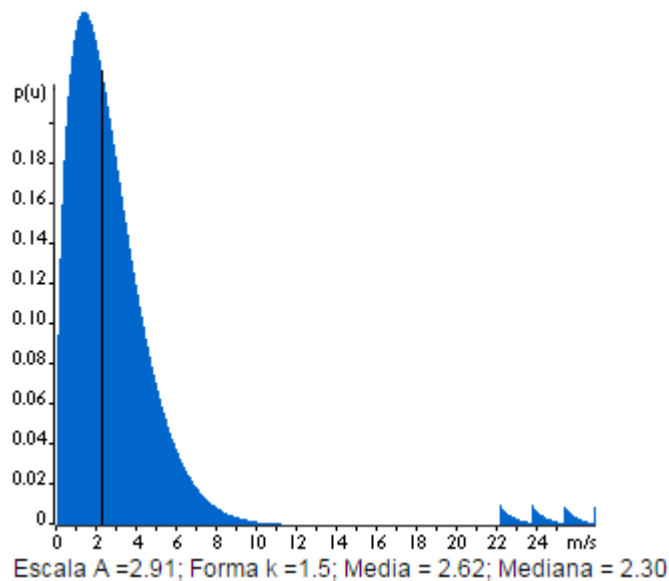


Gráfico 2: distribución de Weibull. (DWIA, 2015).

La mitad del área azul está a la izquierda de la línea negra vertical a 2,3 metros por segundo. La velocidad de 2,3 m/s es la mediana de la distribución. Esto significa que la mitad del tiempo el viento soplará a menos de 2,3 m/s y la otra mitad soplará a más de 2,3 m/s.

La velocidad del viento media es de 2,62 m/s, la cual es realmente el promedio de las observaciones de la velocidad del viento.

Como se puede observar, la distribución de las velocidades del viento es sesgada, es decir, no es simétrica. A veces se tendrán velocidades de viento muy altas, pero son muy raras.

4. Metodología desarrollada.

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se planteó la necesidad de obtener datos reales de velocidades de viento de la provincia de Jujuy, específicamente los recolectados en el Aeropuerto Internacional Gobernador Horacio Guzmán, ubicado en San Salvador de Jujuy, 24.38 °S, 65.08 °W.

Los datos de velocidades de viento fueron obtenidos del sitio web Weather Underground, siendo los mismos promedios diarios registrados durante el período 2013 – 2014.

Además, el proyecto contempla a modo de ejemplo un aerogenerador Marca WINTEC de 1.500 Watt de potencia. En tal sentido, y considerando que los datos de velocidades de viento obtenidos fueron medidos a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo, resulta necesario calcular los mismos a la altura del rotor, para lo cual aplicamos la ecuación (1):

$$V(z)=V(10m) \cdot \frac{\ln(z)-\ln(Rug)}{\ln(10m)-\ln(Rug)} \quad (1)$$

A partir de los valores de viento a la altura del rotor es posible calcular la potencia entregada por el viento en el área barrida por las palas del aerogenerador, cuya longitud es de 15 metros cada una. A tales efectos se aplica la ecuación (5) detallada en el punto 2.33.

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (5)$$

No obstante ello, según lo establecido por el Límite de Betz, analizado en el punto 2.55, solo es factible obtener en un caso ideal el 59,26% de dicha potencia en un aerogenerador. Por lo tanto la ecuación (5) quedará como:

$$P_d = \left(\frac{16}{27}\right) \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (25)$$

Esta es la potencia máxima que puede ser obtenida en un aerogenerador ideal, no obstante lo cual se debe considerar los límites propios del aerogenerador y su rendimiento. A tales efectos, para aproximar el funcionamiento del aerogenerador seleccionado, por un lado se limitó la potencia aprovechable calculada por la ecuación (25) a 1,5 KW cuando la misma excedía dicho valor, además cuando potencia era inferior a 1,5 KW se consideró un aprovechamiento del 80%, y por último para aquellos registros en los cuales la velocidad resultaba inferior a 3 m/s, velocidad mínima informada por el fabricante del aerogenerador, se consideró que la potencia aprovechable era 0 MW.

A partir de este valor de potencia que podría efectivamente entregar el aerogenerador se estimó el valor diario de energía del aerogenerador, obteniendo de esta forma el potencial eólico del área analizada.

Como ejemplo de los valores calculados, según el procedimiento descrito anteriormente, a continuación se detallan los valores obtenidos y calculados para la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto Internacional Gobernador Horacio Guzmán, ubicado en San Salvador de Jujuy, 24.38 °S, 65.08 °W., durante el mes de Enero de 2013.

Tabla II: valores obtenidos y cálculos efectuados.

	Generador Eólico					
	Velocidad Promedio	Velocidadh Rotor	Potencia del Viento	Potencia Aprovechada	Límite Aerogener.	Energía Total Generada
	[m/s]	[m/s]	[kW]	[kW]	[kW]	[kWh]
01/01/2013	6,39	6,70	1,813	1,074	0,859	21
02/01/2013	2,22	2,33	0,076	0,045	0,000	0
03/01/2013	0,83	0,87	0,004	0,002	0,000	0
04/01/2013	1,39	1,46	0,019	0,011	0,000	0
05/01/2013	1,67	1,75	0,032	0,019	0,000	0
06/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
07/01/2013	1,39	1,46	0,019	0,011	0,000	0
08/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
09/01/2013	6,39	6,70	1,813	1,074	0,859	21
10/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
11/01/2013	2,22	2,33	0,076	0,045	0,000	0
12/01/2013	2,22	2,33	0,076	0,045	0,000	0
13/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
14/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
15/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
16/01/2013	3,06	3,20	0,198	0,118	0,094	2
17/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
18/01/2013	0,83	0,87	0,004	0,002	0,000	0
19/01/2013	2,22	2,33	0,076	0,045	0,000	0
20/01/2013	2,22	2,33	0,076	0,045	0,000	0
21/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
22/01/2013	1,67	1,75	0,032	0,019	0,000	0
23/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
24/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
25/01/2013	5,00	5,24	0,869	0,515	0,412	10
26/01/2013	3,06	3,20	0,198	0,118	0,094	2
27/01/2013	2,22	2,33	0,076	0,045	0,000	0
28/01/2013	5,00	5,24	0,869	0,515	0,412	10
29/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0
30/01/2013	3,89	4,08	0,409	0,242	0,194	5
31/01/2013	2,78	2,91	0,149	0,088	0,000	0

Como Anexo A, se adjunta la totalidad de los valores obtenidos y calculados para el periodo 2013 – 2014.

5. Conclusiones.

La principal conclusión del presente trabajo es que los resultados obtenidos no son determinantes a los fines de analizar la factibilidad técnica de obtención de energía eléctrica a partir de aerogeneradores instalados en la zona estudiada.

Como se puede observar en la tabla II, solo se obtendría energía durante 7 días del mes de enero del año analizado, con la utilización del aerogenerador propuesto. Por lo cual no resulta posible asegurar que los resultados obtenidos sean concluyentes.

En función de todo lo expuesto en el presente trabajo, se considera que los resultados obtenidos, tanto para la potencia aprovechable, así como para la energía generada no son definitivos a los fines de analizar la factibilidad técnica en cuanto a la generación de energía eléctrica a partir de energía eólica en la zona de estudio, es decir, el Aeropuerto Internacional Gobernador Horacio Guzmán, ubicado en San Salvador de Jujuy, 24.38 °S, 65.08 °W.

6. Bibliografía.

ATLAS EÓLICO, EUROPEO. 2015. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía. [En línea] 2015. [Consultado el: 4 de May de 2015.] <http://www.idae.es>.

DWIA. 2015. Danish Wind Industry Association. [En línea] 2015. [Consultado el: 24 de Sep de 2015.] <http://windpower.org>.

MUR AMADA, Joaquín. 1999. *Curso de Energía Eólica*. Zaragoza : Departamento de Energía Eléctrica de la Universidad de Zaragoza, 1999.

WEATHER UNDERGROUN. [En línea] 2015. [Consultado el: 12 de Ago de 2015.] <https://www.wunderground.com/>.

7. Listado de Anexos.

Anexo A: Planilla Excel con la siguiente información:

- Datos del generador propuesto
- Datos obtenidos del sitio web Weather Underground para el Aeropuerto Internacional Gobernador Horacio Guzmán.
- Valores calculados para el período 2013 – 2014.