

Análisis del Recurso Eólico mediante la Transformada Wavelet con Aplicación a la Estimación de la Producción Eléctrica en Aerogeneradores

J.C. Herrera

Operador Nacional de Electricidad, CENACE
E-mail: jherrera@cenace.org.ec

Resumen

En el ámbito de los estudios de pre factibilidad y factibilidad de una central eólica, se aplica la Transformada Wavelet Discreta al análisis de los registros de viento de un emplazamiento con el fin de descomponer la serie en su espectro de frecuencias.

La serie descompuesta para varias Wavelet madre y filtrada se emplea para estimar la energía que produciría la central a través del análisis de la función de densidad de probabilidad de Weibull del emplazamiento.

Para validar el modelo se analizan los resultados de la estimación de la energía empleando la serie original de vientos, aquella obtenida con la serie descompuesta a través de Wavelet y la energía real medida en una central existente, tomada como caso de estudio.

Palabras clave— Transformada Wavelet, Función de Weibull, Energía Eólica, Aerogeneradores.

Abstract

In the field of prefeasibility and feasibility of a wind farm, Discrete Wavelet Transform is applied to the analysis of wind records at a site in order to decompose the series in its frequency spectrum.

The decomposed series and filtered several mother Wavelet is used to estimate the energy they produce the center through the analysis of the probability density function of Weibull site.

To validate the model results energy estimate is analyzed using the original number of winds, that obtained through the wavelet decomposed and the actual energy measured in an existing plant, taken as a case study series.

Index terms— Wavelet Transform, Weibull function, Wind Power, Wind Energy Turbines.

Recibido: 12-10-2015, Aprobado tras revisión: 24-11-2015.

Forma sugerida de citación: Herrera J. C. (2016). "Análisis del Recurso Eólico mediante la Transformada Wavelet con Aplicación a la Estimación de la Producción Eléctrica en Aerogeneradores". Revista Técnica "energía". No 12, Pp. 56-63.

ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería de la energía eólica se han desarrollado las herramientas matemáticas para determinar el potencial energético y la energía eléctrica que está en capacidad de producir un aerogenerador con base al historial de mediciones de la velocidad del viento registradas en un emplazamiento.

Generalmente la distribución de probabilidad de las velocidades de viento se ajusta la función de densidad de probabilidad de Weibull y una vez determinada esta función para un emplazamiento específico es posible determinar su potencial energético. Se puede emplear la curva de potencia de los aerogeneradores, proporcionados por los fabricantes, junto con la función de densidad de probabilidad de Weibull, para establecer con un grado de aproximación importante la energía eléctrica que produciría el parque eólico con cada tipo de aerogenerador.

Esta información es muy relevante en estudios de pre factibilidad y factibilidad del proyecto, puesto que contribuye a establecer la viabilidad económica del mismo.

Por lo expuesto, es importante aplicar mecanismos que contribuyan al incremento la exactitud del cálculo del potencial energético del emplazamiento, o lo que es lo mismo, a mejorar la exactitud en el cálculo de la función de densidad de probabilidad de Weibull.

En los últimos años se ha desarrollado de manera importante el estudio del tratamiento de señales mediante el análisis Wavelet y su aplicación a los campos de la ingeniería eléctrica.

Específicamente, se descompone la señal bajo análisis en un conjunto de funciones con distintos rangos de frecuencia para posteriormente eliminar aquellos componentes que no son de interés.

Cuando se trata de señales eléctricas como voltaje o corriente esta acción de filtrado permite eliminar ruido indeseado que obstaculiza el análisis.

En el presente trabajo se explorará la posibilidad de aplicar el análisis Wavelet descrito a la serie de magnitudes de viento con el fin de obtener una reconstrucción de la serie original, procesada convenientemente, y sobre la cual determinar la

función de densidad de probabilidad de Weibull y el análisis energético descrito.

2. REPRESENTACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DEL VIENTO

Para el análisis se han considerado las mediciones de velocidad del viento provenientes de una torre de medición configurada para el efecto.

Se disponen de 42637 datos de velocidad registrados cada diez minutos (7115 horas), cuyo número es adecuado para el análisis propuesto. En la Figura 1 se representa la muestra de datos disponibles.

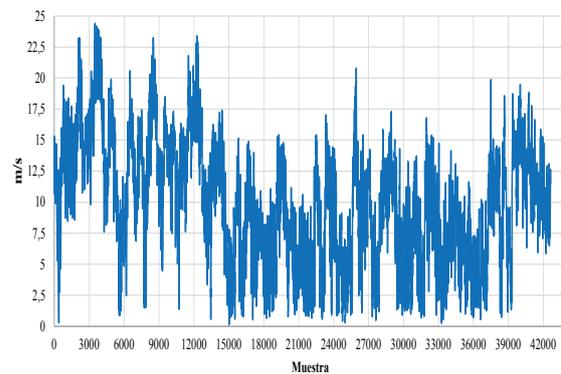


Figura 1: Representación gráfica de las velocidades de viento

En la tabla 1 se encuentra la estadística descriptiva de la muestra:

Tabla 1: Estadística descriptiva de la muestra en base horaria

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Media	9.8938	Coef. de asimetría	0.1768
Error típico	0.0571	Rango	23.7733
Mediana	9.8517	Mínimo	0.2800
Moda	10.9750	Máximo	24.0533
Desviación estándar	4.8130	Suma	70394.31
Varianza	23.1652	Cuenta	7115

El análisis de esta serie de datos con fines de determinar el potencial eólico parte de determinar los parámetros de la Función de Densidad de Probabilidad de Weibull, que generalmente se representa como:

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

Donde v es la velocidad del viento en (m/s), k es un factor de forma que representa la asimetría de la función y c es un factor de escala que suele aproximarse al valor medio de la serie de velocidades (m/s).

Los factores k y c son particulares para cada emplazamiento y en el presente trabajo se calculan aplicando un ajuste de mínimos cuadrados empleando la distribución acumulada de la Función de Distribución de Probabilidad de Weibull $F(v)$, expresada como sigue:

$$F(v) = 1 - e^{-(v/c)^k} \quad (2)$$

Aplicando el logaritmo neperiano a ambos lados de la ecuación se obtiene [1]:

$$\ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln(v) - k \ln(c) \quad (3)$$

Siendo:

$$X = \ln(v) \quad (4)$$

$$Y = \ln[-\ln(1 - F(v))] \quad (5)$$

La recta de la ecuación (6) se ajusta por mínimos cuadrados:

$$Y = k(X - \ln(c)) \quad (6)$$

Para un vector de velocidades de viento $V = [v_1, v_2, \dots, \dots, v_n]$, por ejemplo las velocidades horarias obtenidas con el promedio de las mediciones de viento cada diez minutos, y que se ha dividido en clases con una Frecuencia relativa f_i para cada clase y una Frecuencia Relativa Acumulada F_i , las expresiones para determinar los coeficientes de la recta de regresión lineal de (4) son [2]:

$$k = \frac{\sum f_i x_i y_i - (\sum f_i x_i)(\sum f_i y_i)}{(\sum f_i x_i^2) - (\sum f_i x_i)^2} \quad (7)$$

$$B = \sum f_i y_i - k \sum f_i x_i \quad (8)$$

$$c = e^{-B/k} \quad (9)$$

Considerando la muestra de velocidades de viento descrita en el numeral 2 anterior, se determinan los valores de las constantes de Weibull como sigue:

Tabla 2: Cálculo de los parámetros de Weibull

v_i (m/s)	Med.	Frec. (f_i)	Frec. (F_i) Acumulada	$y_i = \ln(-\ln(1-F_i))$	$x_i = \ln(v_i)$
1	62	0,0087	0,0087	-4,7385	0,0000
2	230	0,0323	0,0410	-3,1723	0,6931
3	313	0,0440	0,0850	-2,4206	1,0986
4	314	0,0441	0,1292	-1,9783	1,3863
5	352	0,0495	0,1786	-1,6256	1,6094
6	419	0,0589	0,2375	-1,3049	1,7918
7	487	0,0684	0,3060	-1,0072	1,9459
8	487	0,0684	0,3744	-0,7570	2,0794
9	461	0,0648	0,4392	-0,5475	2,1972
10	517	0,0727	0,5119	-0,3324	2,3026
11	485	0,0682	0,5800	-0,1420	2,3979
12	489	0,0687	0,6488	0,0453	2,4849
13	489	0,0687	0,7175	0,2343	2,5649
14	510	0,0717	0,7892	0,4426	2,6391
15	419	0,0589	0,8481	0,6336	2,7081
16	349	0,0491	0,8971	0,8216	2,7726
17	261	0,0367	0,9338	0,9988	2,8332
18	146	0,0205	0,9543	1,1269	2,8904
19	112	0,0157	0,9701	1,2552	2,9444
20	70	0,0098	0,9799	1,3628	2,9957
21	49	0,0069	0,9868	1,4648	3,0445
22	40	0,0056	0,9924	1,5853	3,0910
23	30	0,0042	0,9966	1,7390	3,1355
24	23	0,0032	0,9999	2,1827	3,1781
25	1	0,0001	1,0000		3,2189
Σ	7.115	1,0000			

El resultado del cálculo empleando las ecuaciones (7), (8) y (9) anteriores es de $k = 1.9705$ y $c = 11.21$, configurando la siguiente función de distribución de probabilidad para el emplazamiento:

$$p(v) = 0.17576(0.0892v)^{0.97} e^{-(0.0892v)^{1.97}} \quad (10)$$

En la siguiente figura se observa la representación de esta función:

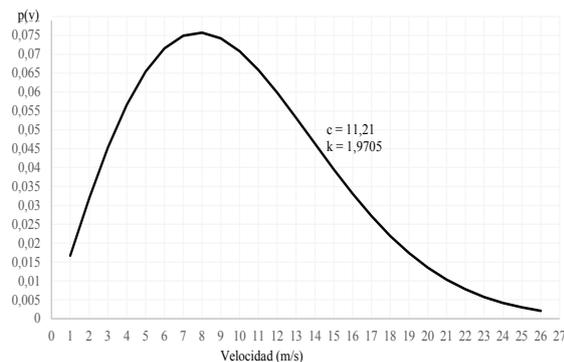


Figura 2: Densidad de probabilidad $p(v)$ del caso de estudio

3. ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA

Una vez determinados los parámetros que representan matemáticamente el comportamiento del viento en el emplazamiento escogido se pueden estimar la energía eólica y eléctrica disponible.

Se debe considerar que la transformación de energía eólica en eléctrica una vez instalado el aerogenerador será mucho menor en función del límite de Betz, la densidad del aire en el emplazamiento y las pérdidas de orden mecánico y eléctrico en el aerogenerador.

Para el cálculo de la energía producida por un aerogenerador instalado en el emplazamiento se empleará su curva de potencia característica, proporcionada por un fabricante, la cual se muestra en la siguiente figura:

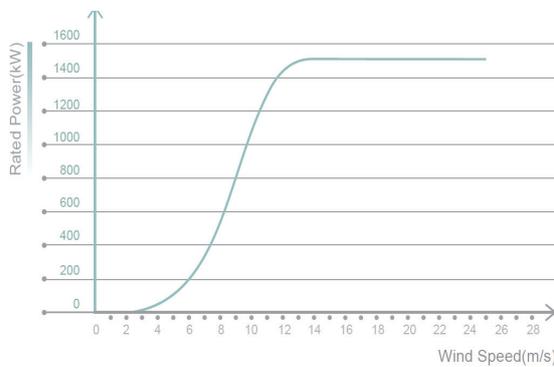


Figura 3: Curva de Potencia del aerogenerador cuando la densidad del aire es de 1.225 kg/m³ (Pnominal 1500kW)

Si se considera que una determinada velocidad de viento (v_i) se presentará durante un determinado número de horas al año (n) y que a cada velocidad (v_i) le corresponde una potencia conforme a la Curva de Potencia de la Figura 3, la energía eléctrica producida por el aerogenerador estará dada por la expresión [2]:

$$E = n \sum P_i p(v_i) \Delta v_i \quad (11)$$

Donde $p(v_i)$ es la función (10) evaluada para cada velocidad v_i que pertenece a cada intervalo Δv_i en el que se haya dividido la muestra de velocidades.

P_i es la potencia producida por el aerogenerador para cada velocidad v_i siguiendo la Curva de Potencia de la Figura 3.

Considerando el tamaño en horas de la muestra ($n = 7115$ horas) la energía producida por el aerogenerador se determina como:

Tabla 3: Cálculo de la energía producida por un aerogenerador

Δv_i	P_i (kW)	$p(v_i)$	$P_i p(v_i)$
1	0	0,0167	0,000
2	0	0,0319	0,000
3	9	0,0454	0,408
4	40	0,0567	2,267
5	100	0,0655	6,547
6	200	0,0716	14,311
7	340	0,0749	25,477
8	530	0,0757	40,138
9	800	0,0742	59,386
10	1.070	0,0708	75,754
11	1.290	0,0659	84,952
12	1.440	0,0598	86,179
13	1.500	0,0532	79,809
14	1.520	0,0463	70,413
15	1.520	0,0395	60,087
16	1.520	0,0331	50,289
17	1.520	0,0272	41,304
18	1.520	0,0219	33,306
19	1.520	0,0174	26,377
20	1.520	0,0135	20,524
21	1.520	0,0103	15,695
22	1.520	0,0078	11,798
23	1.520	0,0057	8,720
24	1.520	0,0042	6,338
25	0	0,0030	0,000
26	0	0,0021	0,000
		Σ	820,077
Energía (kWh) :			5.834.847

La central eólica ubicada en el emplazamiento dispone de 11 aerogeneradores y está ubicada a una altura de 2720 msnm con una temperatura promedio anual de 12°C.

La densidad del aire a esta altura es de 0.897 kg/m³, misma que debe considerarse para encontrar la energía real entregada por el aerogenerador, puesto que el fabricante proporciona la curva de potencia (Figura 3) a nivel del mar y debe ajustarse considerando que la densidad del aire disminuye con la altura y, por lo tanto, la capacidad del aerogenerador de producir trabajo.

Asimismo, debe aplicarse al menos un factor de disponibilidad de la central y las pérdidas eléctricas hasta el punto de entrega al sistema eléctrico de potencia con el fin de estimar de manera más precisa la energía neta que estaría entregando la central.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los cálculos pertinentes:

Tabla 4: Estimación de la energía producida por la central eólica

Parámetro	Valor
Energía de 1 Aerogenerador (kWh)	5.834.847
Energía de la Central (kWh)	64.183.313
Densidad Aire (kg/m ³)	0,8967
Energía de la Central Ajustada Densidad (kWh)	57.552.035
Factor de Disponibilidad (k _a)	0,97
Factor de Pérdidas Eléctricas (k _p)	0,97
Otros Factores de Pérdidas	0
Energía de la Central Ajustada Pérdidas (kWh)	54.150.709

4. ANÁLISIS WAVELET

De forma similar al análisis de Fourier, en la cual una señal se puede representar mediante funciones sinusoidales de diferentes frecuencias, en el análisis Wavelet la señal bajo estudio se puede descomponer en un conjunto de funciones que se deriva de una función principal (Wavelet madre) las cuales son obtenidas por medio del escalamiento y traslación de esta Wavelet madre.

En la siguiente figura se observa el proceso descrito [3]:

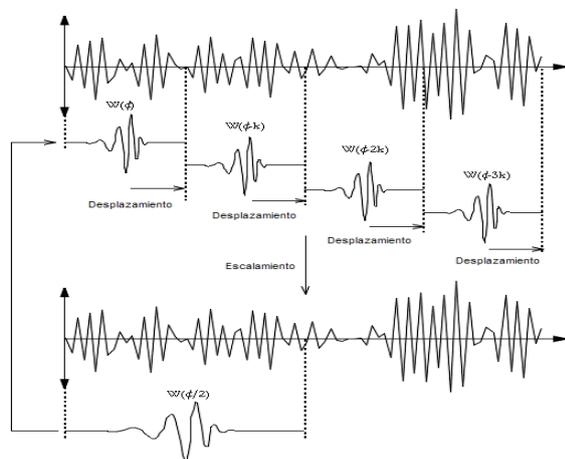


Figura 4: Ilustración del algoritmo de descomposición de señales mediante Wavelets

Una variedad de la Transformada Wavelet es la transformada wavelet discreta (DWT) en la cual se analiza la señal en diferentes bandas de frecuencia con distintas resoluciones.

La DWT utiliza dos conjuntos de funciones: las de escalado y las wavelet, cada una asociada con un filtro paso - bajo y paso - alto, respectivamente. Así, la descomposición de la señal en las diferentes

bandas de frecuencia se realiza con sucesivos filtrados paso - alto y paso - bajo, del registro en el dominio temporal [4].

Existen varias familias de Wavelets, entre las cuales se encuentran Haar, Mexican Hat, Morlet, Meyer, Daubechies, etc. En las siguientes figuras se observa la forma de algunas de estas funciones:

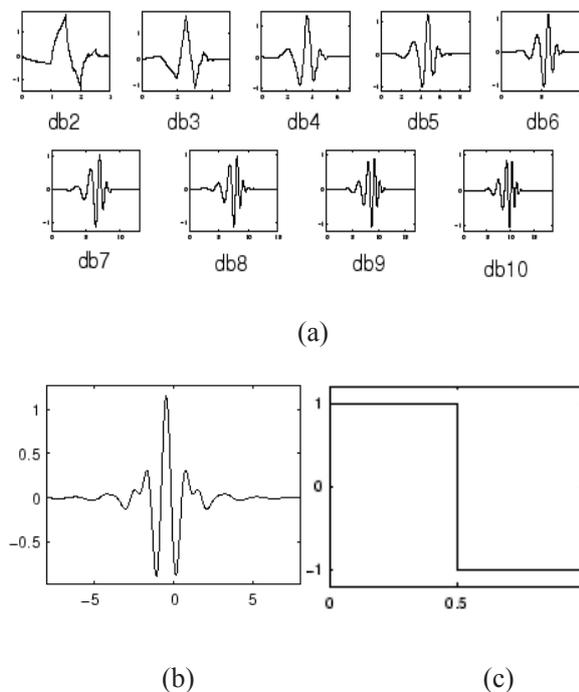


Figura 5: Funciones (a) Daubechies; (b) Haar; (c) Meyer

Para la descomposición de la serie de velocidades del viento se emplearán las ondas madre Haar, Meyer y Daubechies y empleando los desarrollos implementados en Matlab.

A continuación, y a modo de ejemplo, se muestra la descomposición empleando Transformada Wavelet Discreta (DWT) con base a la wavelet Haar:

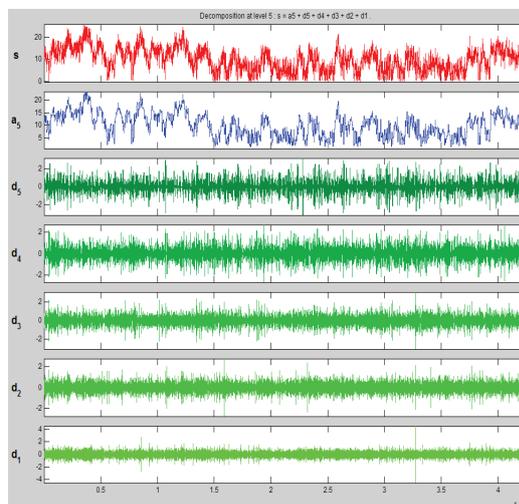


Figura 6: Descomposición DWT empleando Wavelet Haar

La serie original de vientos (en rojo) se descompone en los niveles a_5 , d_5 , d_4 , d_3 , d_2 y d_1 tal que sumados reconstruyen la serie original.

En este punto debe considerarse que, conforme se observa en la Figura 1, las mediciones de viento configuran una serie de alta volatilidad.

Dependiendo del emplazamiento, la presencia de ráfagas en cortos períodos de tiempo no contribuyen de manera efectiva a la producción (o disminución) de energía en el aerogenerador debido a los tiempos de respuesta mecánicos imprimen inercia y un retardo en la respuesta de la máquina.

En este sentido, estos cambios bruscos en la magnitud de la velocidad del viento, incorporados a la valoración de las constantes características de los parámetros de Weibull, podrían arrojar resultados con un margen de error cuya magnitud dependerá del grado de rafagosidad, propia de cada emplazamiento.

Para minimizar este impacto, en el proceso de descomposición de la serie de vientos empleando las Wavelet madre descritas anteriormente se aplica un filtrado con el fin de “suavizar” la serie, reduciendo los valores pico e incrementando el valor medio en cada intervalo de descomposición.

En la siguiente figura se muestra el concepto aplicado:

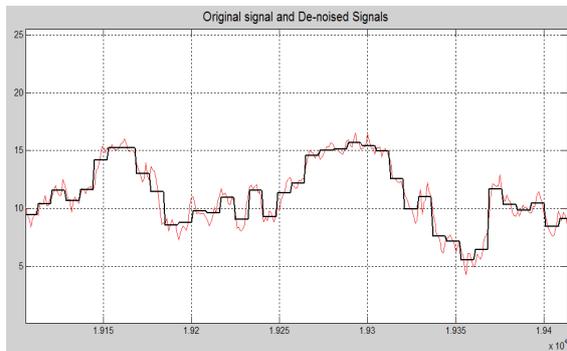


Figura 7: Series original (rojo) y reconstruida filtrada (negro)

Para lograr el grado de “suavización” mostrado en la fig 7 se filtran los componentes d_i empleando las herramientas de Matlab.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Como resultado de la descomposición de la serie de datos de velocidad de viento empleando la TWD para tres Wavelet madre (Haar, Meyer y Daubechies grado 4) se obtienen nuevas series datos para cada descomposición con la siguiente estadística descriptiva:

Tabla 5: Estadística descriptiva de la serie

Estadístico	Haar	Meyer	Db4
Media	9,891	9,891	9,891
Error típico	0,023	0,023	0,023
Mediana	9,926	9,877	9,889
Moda	16,532		
Desviación estándar	4,652	4,728	4,711
Varianza de la muestra	21,645	22,357	22,191
Curtosis	-0,576	-0,571	-0,573
Coficiente de asimetría	0,225	0,204	0,204
Rango	22,447	24,465	24,191
Mínimo	0,861	-0,351	-0,252
Máximo	23,308	24,114	23,939
Suma	421725	421723	421716
Cuenta	42637	42637	42637

Aplicando la metodología descrita en el numeral 2 anterior se determinan los parámetros de Weibull para cada descomposición Wavelet, con los resultados que se exponen en la Tabla 6:

Tabla 6: Parámetros de Weibull

	Original	Haar	Meyer	Db4
k	1,97	2,17	2,07	2,09
c	11,21	11,17	11,23	11,22

En la fig 8 se observan las funciones de densidad de probabilidad para las diferentes descomposiciones Wavelet y para la señal original.

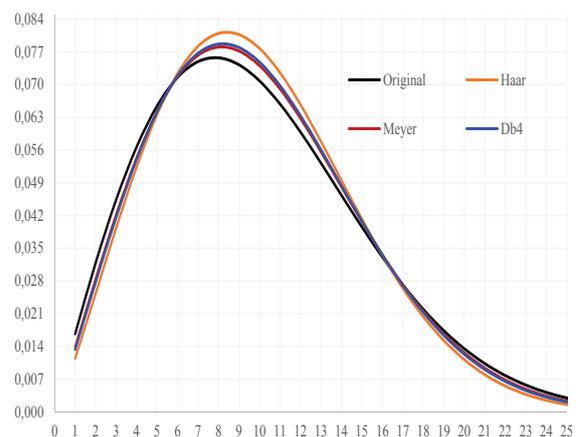


Figura 8: Densidad de probabilidad $p(v)$

Si se aplica la metodología descrita en el numeral 3 anterior para estimar la energía que podría producir la central eólica desmontada a través de Wavelets se determinan los resultados que se muestran en la Tabla 7.

Para el análisis energético hay que anotar que los datos de viento provienen de mediciones de la central eólica Villonaco, ubicada en la zona sur de Ecuador y se registraron entre el 01 de julio de 2013 y el 24 de abril de 2014.

La energía que efectivamente produjo la central, y que fue entregada al sistema eléctrico en ese período, fue de 58.076.082 kWh, valores oficiales registrados en el sistema de medición comercial instalado conforme a la normativa técnica de Ecuador.

Tabla 7: Análisis energético integrado

ANÁLISIS	Original	Haar	Meyer	Db4
Factor de Forma (k)	1,97	2,17	2,07	2,09
Factor de Escala (c)	11,21	11,17	11,23	11,22
Energía de l Aerogen. (kWh)	5.834.847	6.015.272	5.948.085	5.961.700
Energía de la Central (kWh)	64.183.313	66.167.996	65.428.938	65.578.697
Densidad Aire (kg/m ³): 0,8967				
Energía de la Central Ajustada Densidad (kWh)	57.552.035	59.331.664	58.668.964	58.803.250
Factor de Disponibilidad (k _a)	0,97	0,97	0,97	0,97
Factor de Pérdidas Eléctricas (k _p)	0,97	0,97	0,97	0,97
Otros Factores de Pérdidas	0	0	0	0
Energía de la Central Ajustada Pérdidas (kWh)	54.150.709	55.825.163	55.201.628	55.327.978
Energía Real Medida (kWh): 58.076.082				
Error en la estimación (kWh)	-3.925.373	-2.250.920	-2.874.454	-2.748.105
Error en la estimación (%)	-6,8%	-3,9%	-4,9%	-4,7%
Valoración del error (\$)	-358.387	-205.509	-262.438	-250.902

Considerando que se dispone de la energía real producida por la central es factible determinar el grado de precisión de la metodología aplicada, conforme se muestra en la Tabla 7.

En todos los casos, la valoración de la energía empleando la descomposición de Wavelets a la serie de vientos original introdujo un menor error respecto de la metodología descrita en el numeral 2 anterior y en la cual se emplearon directamente las mediciones de viento sin ningún tratamiento previo, resultando más preciso el análisis empleando como Wavelet madre la de Haar.

Para obtener la “Valoración del error (\$)” que se muestra en la Tabla 7 se emplea un valor de 9.13 c\$/kWh, que es la tarifa que se reconoce a la central Villonaco por su producción de energía conforme a la Regulación CONELEC 004/11.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se ha intentado mejorar el proceso de estimación de la energía producida por un parque eólico a través de la introducción de una metodología sustentada en la descomposición de la serie de mediciones de viento aplicando la Transformada Wavelet Discreta. Los resultados obtenidos para el caso de estudio específico permitirían confirmar la validez de la estrategia desarrollada.

La metodología desarrollada permitiría mejorar la precisión en la estimación de la energía producida por un parque eólico en los estudios de pre factibilidad y factibilidad del proyecto, reduciendo el riesgo para el inversionista.

Sin perjuicio de lo anotado, es necesario profundizar en el estudio de un mayor número de casos de estudio con el fin de validar en la práctica el procedimiento desarrollado.

Otro ámbito de estudio que podría emplear los elementos teóricos abordados en este trabajo constituye la predicción de corto plazo de la energía de un parque eólico en el ámbito del despacho de corto plazo, puesto que el disponer de una serie de datos de vientos previamente tratada contribuirá a la exactitud de cualquier modelo de predicción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

[1] L.F. Zhang, M. Xie, L.C Tang “Bias correction for the least squares estimator of Weibull shape parameter with complete and censored data”. ELSEVIER. Reliability Engineering and System Safety 91 (2006) 930–939.

[2] M. Villarrubia, Ingeniería de la Energía Eólica. Marcombo S.A. 2012.

- [3] J. Cortez, H. Cano, y J. Chaves “Del Análisis de Fourier a las Wavelets - Transformada Continua Wavelet (CWT)”. *Scientia et Technica* Año XIII, No 37, Diciembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [4] J. Poza, D. Abásolo et. al. “Análisis de Electroencefalogramas con la Transformada Wavelet Discreta. Aplicación a la Enfermedad de Alzheimer”. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid. Valladolid, España. 2015.
- [5] J. Tejada y F. Aranda, *La Transformada Wavelet Aplicada a los Sistemas Eléctricos de Potencia Estado del Arte*. Editorial Académica Española. 2011.
- [6] A. Bogges and F. Narcowich, *A First Course in Wavelets with Fourier Analysis*. Wiley. 2012.
- [7] S. Malat, *A Wavelet Tour for Signal Processing The SparSe Way*. Academic Press. 2009.
- [8] H. Stark, *Wavelets and Signal Processing*. Springer. 2005.
- [9] M. Weeks, *Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets*. Infinity Science Press LLC. 2007.
- [10] H. Liviani, “A Machine Learning and Wavelet-Based Fault Location Method for Hybrid Transmission Lines”. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 1, January 2014.
- [11] M. Chaouch, “Clustering-Based Improvement of Nonparametric Functional Time Series Forecasting: Application to Intra-Day Household-Level Load Curves”. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 1, January 2014.
- [12] J. Hu, J. Wang, K. Ma “A hybrid technique for short-term wind speed prediction”. *ELSEVIER. Energy* 81 (2015) 563 - 574.
- [13] H. Liu, H. Tian, Y. Li “Comparison of new hybrid FEEMD-MLP, FEEMD-ANFIS, Wavelet Packet-MLP and Wavelet Packet-ANFIS for wind speed predictions”. *ELSEVIER. Energy Conversion and Management* 89 (2015) 1 – 11.
- [14] Md. Alam, S. Reman, et. al “Extraction of the inherent nature of wind speed using wavelets and FFT”. *ELSEVIER. Energy for Sustainable Development* 22 (2014) 34–47.
- [15] D. Liu, D. Niu, et. al “Short-term wind speed forecasting using wavelet transform and support vector machines optimized by genetic algorithm”. *ELSEVIER. Renewable Energy* 62 (2014) 592 - 597.
- [16] F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani “Wavelet spectral analysis of the temperature and wind speed data at Adrar, Algeria”. *ELSEVIER. Renewable Energy* 35 (2010) 1214 – 1219.



Juan Carlos Herrera Heredia.- Nació en Quito, Ecuador en 1968. Ingenier^{ta} Eléctrica con especialización en Sistemas Eléctricos de Potencia por la Escuela Politécnica Nacional de Quito – Ecuador. Maestría de Administración de Empresas con especialización en Gestión de Proyectos Escuela Politécnica Nacional de Quito – Ecuador. Maestría (c) en Energías Renovables en la Escuela Politécnica del Ejército Sangolquí - Ecuador. Sus campos de investigación están relacionados con el desarrollo de las energías renovables, la eficiencia energética y el estudio de los mercados eléctricos