

Análisis de prefactibilidad técnica y económica para la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando Energía Eólica en el Chaco Paraguayo.

F. MITJANS, R. GREGOR

Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (FIUNA)-ANDE

Paraguay

RESUMEN

El presente artículo tiene como objetivo presentar una propuesta novedosa y sustentable enfocada en la generación de energía eléctrica a partir del recurso eólico existente en el Paraguay, específicamente en la Región Occidental. En este contexto, se presenta un análisis de prefactibilidad técnica y económica, cuyos resultados han sido sustentados en base al estudio del recurso eólico disponible en la región utilizando para el efecto una estación meteorológica montada en la Patria cuyos datos (medidos a una altura de 10m sobre el nivel del suelo), han sido extrapolados a 80m utilizando modelos matemáticos disponibles en la literatura y correlacionados con los obtenidos a partir de la estación meteorológica de 15 de Agosto, considerando una latencia de 30 minutos entre medidas,. Los resultados del análisis de los datos han demostrado la factibilidad para la instalación de un sistema eólico capaz producir una potencia eléctrica de 46MWe, operando con un factor de planta de 25% y han sido coherentes con los estudios que sustentan la futura instalación del parque eólico de 49MWe proyectado para el departamento de Tarija (Bolivia), situado en la misma latitud que la estación meteorológica montada en la Patria, aun considerando que el recurso eólico en esta localidad ha sido medido por un periodo de tiempo de cuatro meses (Noviembre de 2012 a Febrero de 2013), los cuales corresponden a los meses de menor velocidad de viento.

A fin de realizar un análisis de prefactibilidad técnica y económica más abarcante, este articulo presenta un estudio técnico desarrollado utilizando la herramienta de simulación computacional MatLab/Simulink y el software Redscreen. El análisis mediante simulaciones considera un escenario realista asumiendo que el sistema eólico se encuentra contactado al Sistema Interconectado Nacional (SIN), previa construcción de una línea de 220 kV desde el punto de generación hasta la estación eléctrica de la localidad de Loma Plata. Para el análisis económico se ha tenido en cuenta los beneficios e incentivos asociados a este tipo de proyectos de generación, en lo que respecta a los bonos de carbono para proyectos del tipo MDL (Mercado de Desarrollo Limpio), además ha sido analizado como alternativa la de negociar la certificación de emisiones reducidas CERs y finalmente ha sido considerada la posibilidad de un aporte estatal para la implementación de este tipo de proyecto.

Palabras Clave: Generación de Energía – Recursos Renovables – MatLab/Simulink – Redscreen.

1. INTRODUCCIÓN

Observando la problemática climática mundial debido al exceso de los gases del tipo invernadero emitidos a la atmósfera y la falta de compromiso de los países desarrollados para el control irrestricto del protocolo de Kyoto, hacen que la situación climática mundial acelere el deterioro del planeta. En contrapartida a lo mencionado en los párrafos anteriores, la búsqueda de nuevas alternativas de energías como son las energías renovables daría un respiro a estos problemas en la actualidad. Países como China y EE.UU, además de algunos países de Europa están actualmente desarrollando tecnologías con recursos renovables enfocando sus esfuerzos en mitigar los problemas asociados al cambio climático. En la zona de América del Sur, se destaca Brasil como uno de los países con mayor innovación en tecnologías asociadas a las energías renovables, seguido por Argentina y Uruguay los cuales dadas su ubicación geográfica y la falta de recursos hídricos para la obtención de energía eléctrica a través de generación hidroeléctrica, han observado que la generación de energías a partir de fuentes renovables es una alternativa viable de desarrollo sostenible y equilibrado.

A nivel local si se tiene en cuenta la matriz energética actual, se pone en evidencia que el mayor porcentaje de la misma está centralizada en la generación eléctrica a través de energía convencional de origen hidráulico. Sin embargo, estudios recientes de perfectibilidad han demostrado que la matriz energética del Paraguay puede ser diversificada hacia otros métodos de generación de energía eléctrica pudiendo inclusive ser viable la generación descentralizada y distribuida desde una perspectiva de la disminución de las pérdidas en el proceso de transición de la energía debido principalmente a que este tipo de generación se encuentra más próximo a la demanda de carga. Una de las alternativas viables son los sistemas eólicos, identificándose entre las regiones de mayor potencial el norte del Chaco, el eje noreste-este-sureste de la región Oriental y el suroeste de la misma. Sin embargo, uno de los factores que gravitan sobre las limitaciones para la instalación de sistemas eólicos a gran escala con alta rentabilidad se vincula con la falta de políticas energéticas que fortalezcan la Ley N° 3009/2006 que regula la Producción y Transporte Independiente de Energía Eléctrica (PTIEE).

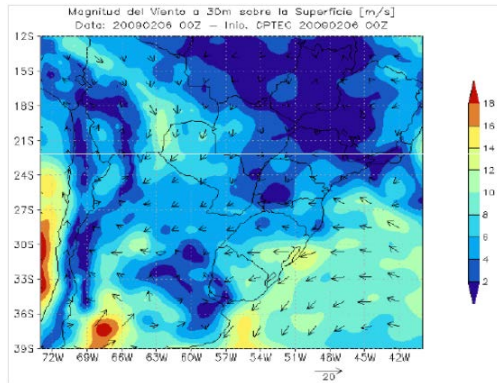
Entre las posibles fortalezas que plantea el presente trabajo se encuentra un nuevo escenario macro energético insertando innovación sobre la matriz energética actual, potenciando la descentralización de la demanda de carga, mejorando la calidad de vida de los habitantes del Departamento de Boquerón, lugar que ha sido tenido en cuenta para el estudio de factibilidad para la inserción de la tecnología eólica. Si se tiene en cuenta el crecimiento vegetativo de la localidad de Boquerón la futura implementación del sistema eólico propuesto en este trabajo, presentaría una alternativa positiva para el Sistema Eléctrico Paraguayo, ya que los equipos de potencia trabajarían con menos carga y se alivianarían la inyección de carga en las líneas de transmisión.

2. POTENCIAL EÓLICO EN PARAGUAY

Los vientos en Paraguay están caracterizados por tres fenómenos principales, **i)** La circulación hacia los centros de altas presiones con el extremo Oeste controlado por el anticiclón del Pacífico y la parte Este controlada por el anticiclón del Atlántico, **ii)** La cordillera de los Andes y altiplano actuando de barrera, suprimiendo vientos del Oeste en todo el territorio y **iii)** El viento generado dependiendo de la intensidad del cuasi estacionario centro de baja presión en el Chaco.

Como resultado de la convergencia de los fenómenos mencionados anteriormente son predecibles las velocidades de viento generalmente bajas durante todo el año principalmente en la parte Este de Paraguay, perteneciente a la zona de alta presión. Sobre el Chaco paraguayo y argentino y las tierras pampeanas y

bolsones se sitúan un sistema de baja presión casi estacionario. En invierno, cuando la de presión se sitúa sobre el Chaco paraguayo, se producen vientos del sector Este que rotan en dirección Noreste en el centro de Paraguay conforme puede apreciarse en la **Figura 1 (a)**.



(a) Magnitud de las velocidades de viento a una altura de 30m sobre la superficie m/s.

(b) Ubicación de las principales Estaciones Meteorológicas en la Región Occidental

Figura 1. Magnitud de velocidades de viento medidas por diferentes estaciones meteorológicas montadas en la Región Occidental.

En verano, la ubicación más al sur de la depresión centrada sobre las áreas montañosas pampeanas producen masas de vientos del sector Norte y Noreste en el Chaco paraguayo. La variación estacional del viento es grande en esta zona, esperándose picos máximos en los meses comprendidos entre agosto a diciembre debido al rápido calentamiento de la zona [1].

2.1. ESTACION METEOROLÓGICA DE LA PATRIA

La estación meteorológica de la Patria montada en el mes de noviembre del año 2012, se encuentra situada en la latitud 21° 21' 59'' y longitud 61° 29' 16'' en la región occidental, específicamente en el departamento de Boquerón, a una distancia aproximada de 130km al noroeste de la ciudad de Mcal Estigarribia y a una distancia de aproximadamente 500km de la ciudad capital tal como se muestra en la **Figura 1 (b)**.

Los instrumentos de medición han sido proveídos por el Centro de Tecnología Apropiaada (CTA), de la Universidad Católica de Asunción (UCA), tanto el anemómetro como la veleta han sido calibrados y sincronizados, para un rango de medición de velocidad media y dirección de viento media con una latencia periódica de 30 minutos, ambos instrumentos han sido instalados por el personal de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC), en un mástil de 10m de altura sobre el nivel del suelo. Los datos medidos han sido almacenados y posteriormente procesados en una computadora, utilizando un dispositivo electrónico registrador de datos ('data logger'). Los datos de velocidad de viento han sido transmitidos vía GPRS (modem) hasta una base de datos central. Los valores de velocidades de viento para la altura de 80m han sido extrapolados utilizando la **Ecuación (1)** extraída de literatura [2]. En la **Tabla (I)** puede apreciarse los resultados de las mediciones realizadas en fecha 20 de noviembre del año 2012, también se observa errores

XI SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014

de instrumentación en los horarios 6:30hs y 20:00hs respectivamente, debidos a que en el mencionado periodo de tiempo ha habido una interrupción en el proceso de transmisión.

$$v_{80} : v_{10} = \frac{\ln\left(\frac{z_{80}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (1)$$

donde V_{80} representa la velocidad del viento a una altura de 80m sobre el nivel del suelo (en m/s), V_{10} la velocidad del viento a una altura de 10m, Z_{80} es la altura sobre el nivel del suelo en la que se estudiará la velocidad del viento (m/s), Z_{ref} representa la altura del equipo de medición sobre el nivel del suelo (m) y Z_0 la longitud de rugosidad en la dirección del viento, 0,28 (m) [2].

Tabla I: Tabla de velocidades de viento en la Estación la Patria 20 de noviembre (2012).

Fecha	Hora	Temp	Sensación Térmica	Índice de calor	Humedad	Punto de rocío	Vel de Viento 10m	Vel de Viento 80m	Ratagos de Viento	Dirección de Viento	Orientación	Lluvia	Presión hPa	Radiación Global	Evapotranspiración	Índice de radiación UV
20/11/2012	00:00	21.8	21.8	21.8	95	21.0	2	3	8	202	SSW	0.0	1011.2	0	0.000	0.0
20/11/2012	00:30	21.8	21.8	21.8	96	21.1	2	3	6	135	SE	0.0	1010.6	0	0.000	0.0
20/11/2012	01:00	22.0	22.0	22.0	96	21.3	2	3	6	158	SSE	0.0	1010.7	0	0.000	0.0
20/11/2012	01:30	22.2	22.2	22.2	96	21.5	0	0	5	135	SE	0.0	1010.6	0	0.000	0.0
20/11/2012	02:00	22.2	22.2	22.2	96	21.5	0	0	3	90	E	0.0	1010.3	0	0.000	0.0
20/11/2012	02:30	22.1	22.1	22.1	97	21.6	0	0	5	90	E	0.0	1010.2	0	0.000	0.0
20/11/2012	03:00	22.1	22.1	22.1	97	21.6	2	3	5	68	ENE	0.0	1010.2	0	0.000	0.0
20/11/2012	03:30	22.2	22.2	22.2	97	21.7	0	0	3	68	ENE	0.0	1010.1	0	0.000	0.0
20/11/2012	04:00	22.1	22.1	22.1	97	21.6	0	0	3	68	ENE	0.0	1010.1	0	0.000	0.0
20/11/2012	04:30	22.1	22.1	22.1	97	21.6	0	0	5	45	NE	0.0	1010.3	0	0.000	0.0
20/11/2012	05:00	22.2	22.2	22.2	97	21.7	0	0	2	68	ENE	0.0	1010.5	0	0.000	0.0
20/11/2012	05:30	22.2	22.2	22.2	97	21.7	0	0	0	-100000		0.0	1010.4	0	0.000	0.0
20/11/2012	06:00	22.2	22.2	22.2	97	21.7	0	0	2	68	ENE	0.0	1010.5	0	0.000	0.0
20/11/2012	06:30	22.2	22.2	22.2	97	21.7	0	0	0	-100000		0.0	1010.7	0	0.000	0.0
20/11/2012	07:00	22.3	22.3	22.3	97	21.8	0	0	3	112	ESE	0.0	1011.0	16	0.000	0.0
20/11/2012	07:30	22.7	22.7	22.7	97	22.2	0	0	3	112	ESE	0.0	1011.3	71	0.000	0.0
20/11/2012	08:00	23.0	23.0	23.0	94	22.0	2	3	3	112	ESE	0.0	1011.5	130	0.051	0.3
20/11/2012	08:30	23.9	23.9	23.2	93	22.7	2	3	5	135	SE	0.0	1011.8	237	0.000	1.0
20/11/2012	09:00	24.2	24.2	23.8	93	23.0	2	3	5	135	SE	0.0	1012.0	206	0.127	1.4
20/11/2012	09:30	24.5	24.5	24.5	91	22.9	2	3	5	135	SE	0.0	1012.3	211	0.000	1.9
20/11/2012	10:00	25.0	25.0	25.7	89	23.1	2	3	6	135	SE	0.0	1012.4	252	0.152	2.5
20/11/2012	10:30	25.8	25.8	27.5	90	24.0	2	3	5	292	WNW	0.0	1012.3	375	0.000	4.3
20/11/2012	11:00	27.7	27.7	32.0	85	24.9	2	3	8	158	SSE	0.0	1012.0	971	0.432	9.0
20/11/2012	11:30	28.6	28.6	33.1	77	24.2	3	5	13	68	ENE	0.0	1011.7	1131	0.000	11.3
20/11/2012	12:00	29.9	29.9	35.6	73	24.6	3	5	10	68	ENE	0.0	1011.3	1172	0.737	13.0
20/11/2012	12:30	30.2	30.2	35.8	71	24.4	3	5	14	45	NE	0.0	1010.9	1122	0.000	13.4
20/11/2012	13:00	31.0	31.0	37.3	69	24.6	3	5	8	248	WSW	0.0	1010.4	1100	0.711	14.0
20/11/2012	13:30	31.3	31.3	36.5	64	23.6	5	8	11	270	W	0.0	1009.9	915	0.000	12.5
20/11/2012	14:00	31.6	31.6	37.4	64	23.9	3	5	10	270	W	0.0	1009.3	1053	0.660	13.5
20/11/2012	14:30	32.4	32.4	39.9	65	25.0	3	5	11	315	NW	0.0	1008.8	1072	0.000	12.3
20/11/2012	15:00	30.3	30.3	35.4	68	23.7	5	8	16	22	NNE	0.0	1008.4	428	0.584	6.1
20/11/2012	15:30	31.9	31.9	38.2	64	24.3	8	13	19	68	ENE	0.0	1007.8	746	0.000	7.1
20/11/2012	16:00	32.8	32.8	37.6	56	22.8	3	5	11	45	NE	0.0	1007.1	825	0.559	6.8
20/11/2012	16:30	32.4	32.4	37.1	57	22.8	3	5	11	45	NE	0.0	1006.8	728	0.000	5.0
20/11/2012	17:00	32.5	32.5	37.0	56	22.6	3	5	11	112	ESE	0.0	1006.2	680	0.508	3.7
20/11/2012	17:30	32.0	32.0	36.8	59	23.0	3	5	10	135	SE	0.0	1006.0	410	0.000	2.0
20/11/2012	18:00	32.1	32.1	36.9	59	23.0	3	5	11	112	ESE	0.0	1005.9	329	0.279	1.1
20/11/2012	18:30	31.4	31.4	36.5	63	23.5	3	5	8	112	ESE	0.0	1006.0	224	0.000	0.2
20/11/2012	19:00	30.1	30.1	35.2	70	24.0	2	3	5	112	ESE	0.0	1005.9	84	0.127	0.0
20/11/2012	19:30	28.1	28.1	32.9	84	25.1	0	0	3	112	ESE	0.0	1006.2	17	0.000	0.0
20/11/2012	20:00	26.9	26.9	30.1	85	24.2	0	0	0	-100000		0.0	1006.4	0	0.000	0.0
20/11/2012	20:30	26.7	26.7	29.2	83	23.5	0	0	2	112	ESE	0.0	1007.0	0	0.000	0.0
20/11/2012	21:00	26.2	26.2	28.4	85	23.5	0	0	2	112	ESE	0.0	1007.3	0	0.025	0.0
20/11/2012	21:30	26.2	26.2	28.4	86	23.7	0	0	3	68	ENE	0.0	1007.6	0	0.000	0.0
20/11/2012	22:00	25.9	25.9	27.8	86	23.4	2	3	5	90	E	0.0	1007.8	0	0.025	0.0
20/11/2012	22:30	25.6	25.6	26.9	86	23.0	2	3	5	90	E	0.0	1008.1	0	0.000	0.0
20/11/2012	23:00	25.2	25.2	26.2	87	22.9	2	3	5	68	ENE	0.0	1008.4	0	0.025	0.0
20/11/2012	23:30	25.1	25.1	25.8	87	22.7	2	3	5	112	ESE	0.0	1008.3	0	0.000	0.0

En la **Figura 2** se puede observar la distribución del viento predominante sobre la estación meteorológica. A partir de la rosa de dirección de viento puede apreciarse que los vientos predominantes son del tipo Este Noreste (ENE), en horario diurno con un peso del 25% sobre el total de todas las mediciones procesadas durante los 4 meses medidos, en el horario nocturno, con un 5% le siguen las medidas en la dirección Suroeste (WSW), este cambio brusco en la dirección de viento es debido a los cambios de presión de viento que ocurren en el horario diurno y nocturno, acompañado de un brusco descenso de la temperatura en el horario nocturno. Durante el horario diurno la temperatura ambiente va en aumento acompañado de un aumento de velocidad y en la noche ocurre el proceso inverso, produciéndose así el fenómeno de inercia térmica.

XI SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014

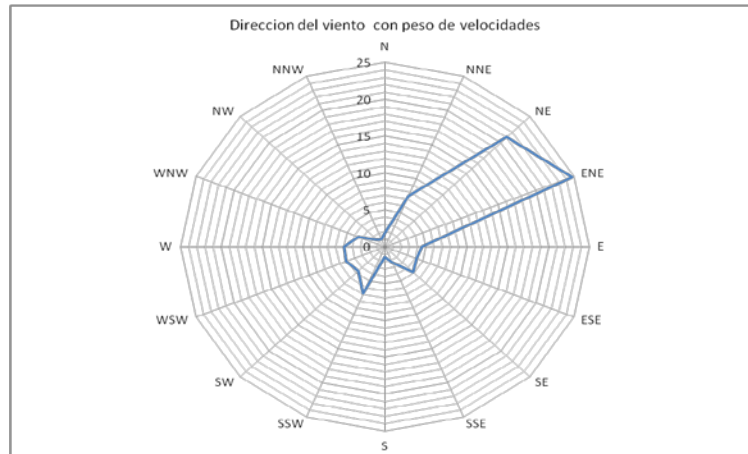


Figura 2: Rosa de dirección de viento y peso de velocidades de viento.

En la **Figura 3** se observa que la velocidad de viento media diaria aumenta durante el día alcanzando su valor máximo de 16m/s y disminuyendo bruscamente durante la noche alcanzando un valor mínimo de 7 m/s. La velocidad de viento media diaria durante los 4 meses medidos ha sido de 11,16 m/s a 80m de altura sobre el suelo. Con lo observado se puede estimar que las velocidades de viento serian superiores en los meses faltantes, entiéndase que estas mediciones corresponden a los meses de menor velocidad de viento.

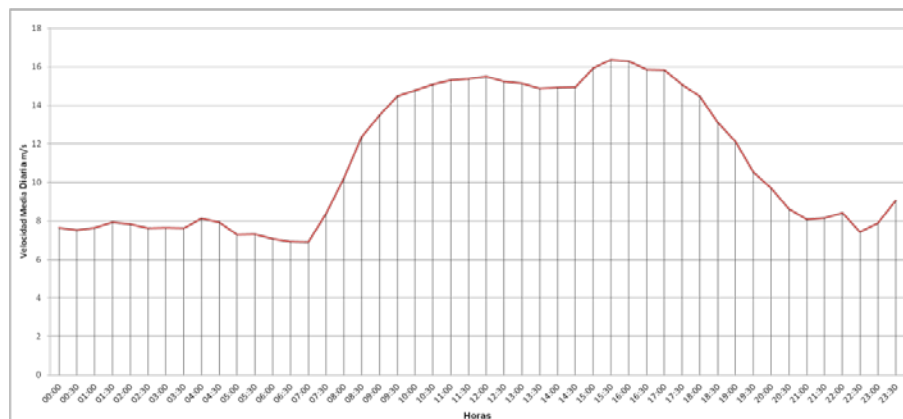


Figura 3: Velocidad de viento media diaria, (16 de noviembre del 2012 al 16 de febrero del 2013) la Patria.

Por otro lado en Bolivia, específicamente en el departamento de Tarija (situado en la misma latitud que la estación meteorología de la Patria), a la fecha (Agosto de 2014) está siendo montado un Parque Eólico de 49,5MWe, lo que refuerza la hipótesis del aumento tendencial de la velocidad de viento en la zona del Dpto. de Boquerón [4]. Teniendo como antecedente esto, y los resultados de las mediciones de la estación meteorológica de 15 de agosto que se muestran en la **Figura 4** donde se puede apreciar el aumento de la velocidad de viento entre ambas estaciones para los mismos meses medidos, se constata que existe potencial eólico suficiente en la zona Oeste del Chaco para pensar en la instalación de una generación eólica a gran escala, en contrapartida, la misma consideración expuesta anteriormente presentará un cierto grado de incertidumbre ya que no se dispone de mediciones expandidas de velocidad de viento a lo largo del 1 año en ninguna de las estaciones meteorológicas en el Dpto. de Boquerón, por lo que este trabajo se aboca al modelo matemático con los datos escrutados, de manera a poder obtener una visión más clara.

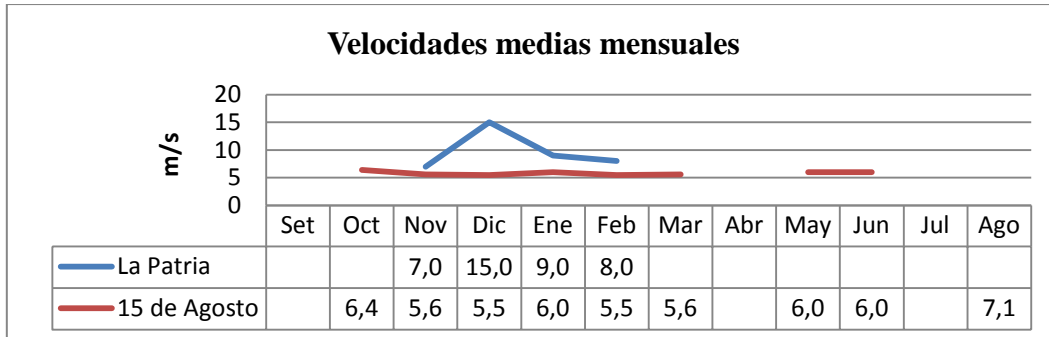


Figura 4: Velocidades media mensual de viento.

A fin de elaborar el modelo matemático de una única curva de regresión polinómica (**Figura 5**), que permita estimar el comportamiento no lineal de las mediciones, han sido procesados los datos de velocidades medias mensuales medidas entre el 16 de noviembre del 2012 al 16 de febrero del 2013 de la estación meteorológica de la Patria, y entre el 10 de diciembre del 2008 al 24 de octubre del 2010 de la estación meteorológica de la localidad de 15 de Agosto, los meses faltantes para completar un año, que no fueron computados corresponden a los meses que no se obtuvieron mediciones por falla en los equipos, no obstante, los resultados obtenidos del modelo matemático y estadístico, ayudan a confirmar el valor promedio anual mínimo de la velocidad del viento en 7 m/s, a una altura de 80 m sobre el nivel de la superficie, potencia media anual de 325 W/m², en lo que concierne a los resultados estadísticos mediana de 6,3m/s, el índice de correlación resultante es 77%, la desviación estándar de +5,13% y una varianza de 26,36%.

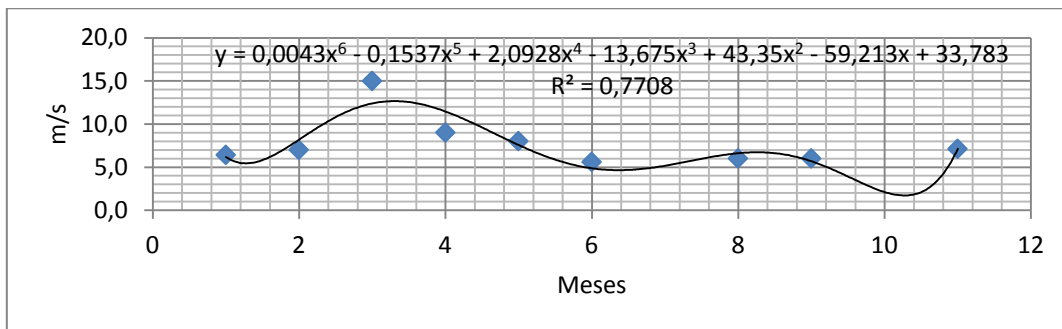


Figura 5: Curva característica del comportamiento de la velocidad del viento media mensual en la Patria.

En la **Figura 6** se observa el cambio brusco de velocidades de viento debido al cambio de presión y temperatura en el horario diurno y nocturno respectivamente, formando crestas en la distribución de las frecuencias relativas de velocidades de viento. La baja sensibilidad de los instrumentos de medición en la localidad de la Patria provoca comportamientos no Gaussianos (o estadísticos tipo Weibull) en la curva de frecuencias, la cual presenta una forma de función sesgada no simétrica, tal como puede apreciarse en la figura.

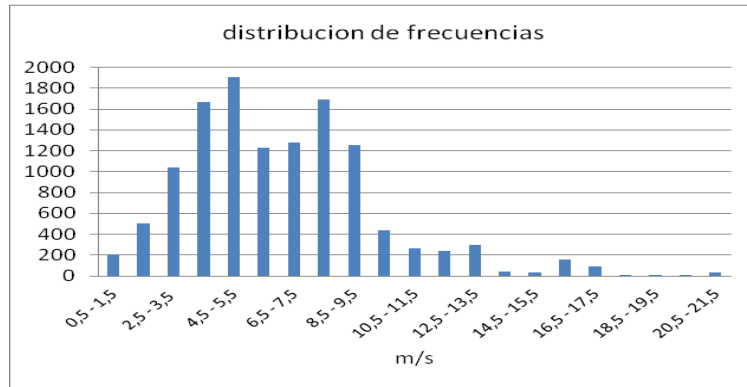


Figura 6: Distribución de frecuencias de velocidades en la Patria. Fuente: propia (2013).

Por otro lado, en la **Figura 7** se observa la densidad de distribuciones de Weibull para los distintos valores del factor de forma k , la misma indica la asimetría de la función de probabilidad. De esta forma se presenta el mejor ajuste Weibull de las curvas de frecuencia relativa de los datos medidos y procesados, los mismos se obtuvieron por medio de la **Ecuación (2)**, la cual proporciona el número total de horas al año que se prevé pueda soplar el viento, sobre el eje de ordenadas en % y la velocidades de viento m/s, sobre el eje de abscisas [2].

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \varepsilon^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

donde c representa la velocidad media , v denota los distintos valores de la velocidades de viento y k el factor de asimetría.

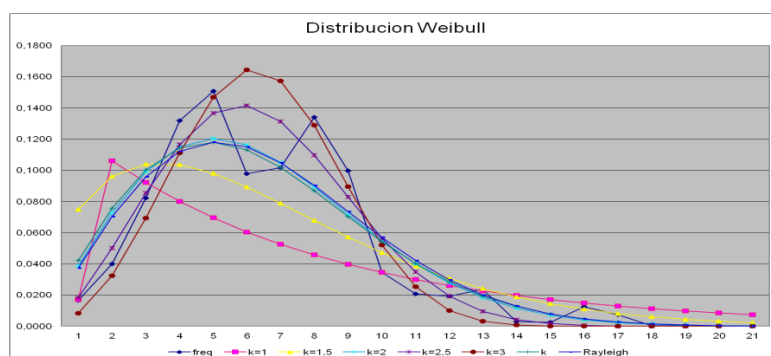


Figura 7: Densidad de distribuciones de Weibull para las velocidades de viento en medidas en la localidad de La Patria.

En la **Figura 8**, se muestra el entorno de análisis realizado con la herramienta RETScreen que es utilizado para el estudio y análisis de sistemas energéticos. Puede apreciarse en la figura los parámetros que se han considerado y que han sido producto del análisis precedente basado en las

XI SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014

velocidades de vientos medidas por a partir de las estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio de factibilidad que aborda el presente trabajo.

Site Conditions		Estimate	Notes/Range
Project name		La Patria	See Online Manual
Project location		Boqueron	
Wind data source		Wind speed	
Nearest location for weather data		La Patria	See Weather Database
Annual average wind speed	m/s	7.0	
Height of wind measurement	m	80.0	3.0 to 100.0 m
Wind shear exponent	-	0.28	0.10 to 0.40
Wind speed at 10 m	m/s	3.9	
Average atmospheric pressure	kPa	94.4	60.0 to 103.0 kPa
Annual average temperature	°C	30	-20 to 30 °C

System Characteristics		Estimate	Notes/Range
Grid type	-	Isolated-grid	
Peak load	kW	100.000	
Wind turbine rated power	kW	2300	→ Complete Equipment Data sheet
Number of turbines	-	20	
Wind plant capacity	kW	46.000	
Hub height	m	80.0	6.0 to 100.0 m
Wind speed at hub height	m/s	7.0	
Wind power density at hub height	W/m ²	402	
Wind penetration level	%	46.0%	
Suggested wind energy absorption rate	%	See manual	
Wind energy absorption rate	%	93%	
Array losses	%	3%	0% to 20%
Airfoil soiling and/or icing losses	%	2%	1% to 10%
Other downtime losses	%	2%	2% to 7%
Miscellaneous losses	%	3%	2% to 6%

Annual Energy Production		Estimate Per Turbine	Estimate Total	Notes/Range
Wind plant capacity	kW	2.300	46.000	
	MW	2.300	46,000	
Unadjusted energy production	MWh	6.773	135.457	
Pressure adjustment coefficient	-	0.93	0.93	0.59 to 1.02
Temperature adjustment coefficient	-	0.95	0.95	0.98 to 1.15
Gross energy production	MWh	5.984	119.677	
Losses coefficient	-	0.90	0.90	0.75 to 1.00
Specific yield	kWh/m ²	850	850	150 to 1,500 kWh/m ²
Wind plant capacity factor	%	25%	25%	20% to 40%
Renewable energy collected	MWh	5.407	108.145	
Renewable energy delivered	MWh	5.029	100.574	
	GJ	18.103	362.068	
Excess RE available	MWh	379	7.570	

Figura 8: Entorno de la herramienta RETScreen utilizado para el estudio y análisis de sistemas eólicos.

A partir del análisis realizado utilizando la herramienta RETScreen, se ha seleccionado el generador eólico del tipo triple aspas de paso variable y de potencia nominal 2300kWe con velocidad de arranque de 3m/s, el cual va aumentando progresivamente, hasta alcanzar la velocidad nominal de 9m/s. Estos datos son coherentes con los perfil de vientos medidos por las diferentes estaciones meteorológicas utilizadas como punto de partida para el desarrollo del presente trabajo. La Generación Eólica total tendría una potencia instalada cercana a los 46MWe, conformado por 20 generadores eólicos de 2,3MWe de potencia nominal cada uno, montados torres de 80m de altura sobre el nivel del suelo, considerando un factor de planta del 25% y una capacidad de generación de energía anual de 100.574 MWH/año. El nivel de tensión de transformación sería 0,69/30kV, los mismos se conectarían hasta un Estación de 30/23kV mediante autotransformadores (operando como generación distribuida) distante 30km del punto de generación, y en el nivel de tensión 30/220kV mediante banco de transformadores monofásicos, (operando en el Sistema Eléctrico Paraguayo), previa construcción de una Línea de Transmisión Aérea de 220kV circuito simple de 130km de longitud, desde el sitio de Generación Eólica hasta la Estación Mariscal Estigarribia 220kV. Cabe recalcar que en la actualidad la estación mariscal estigarribia es alimentada desde la Subestación Filadelfia lo que implica que se deberán realizar adecuaciones en la estación Mariscal Estigarribia para poder operar en el nivel de tensión 220kV [5].

3. SISTEMA OESTE DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARAGUAYO

Observando la extensa longitud que existe entre los puntos de generación y consumo de energía, específicamente en la Región Occidental, con este artículo se pretende plantear un nuevo escenario macroenergético en lo que respecta a la implementación de nuevas tecnologías emergentes para sistemas de potencia, entendemos que con esto paliaríamos parcialmente los problemas que pudieran tenerse en un futuro no muy lejano, considerando la razón de crecimiento anual y el inminente uso de toda la energía disponible de las binacionales para el año 2030 [6]. La **Figura 9** muestra las proyecciones de la demanda de energía del Sistema Oeste, a mediano plazo (2013-2022), vista desde la estación Loma Plata 220kV. Esta estación abastece a las Ciudades de Filadelfia y Mariscal Estigarribia con un factor de carga cercano al 70%, para una razón de crecimiento interanual del 10%. Esta proyección en la demanda del consumo demuestra la limitación para poder cubrir la demanda estimada, teniendo en cuenta que la cantidad de energía generada representa el 67% de la cantidad de energía que sería necesaria para cubrir toda la demanda de energía del año 2013. A partir de esta premisa el presente trabajo plantea dos escenarios posibles, el primer escenario se basa en la operación del parque eólico como sistema de generación aislado de la red de distribución. El segundo escenario plantea un sistema eólico interconectado al Sistema Eléctrico Paraguayo, teniendo en cuenta que la construcción de una segunda línea de transmisión de 220kV a Loma Plata, está planificada para el año 2021, previa construcción y culminación de 2 Líneas de 500kV una de Yacyreta y otras 2 de Itaipu [5].

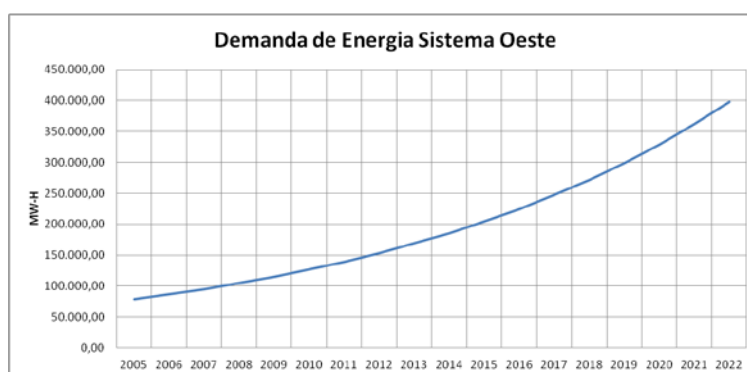


Figura 9: Demanda de energía anual del Sistema Oeste.

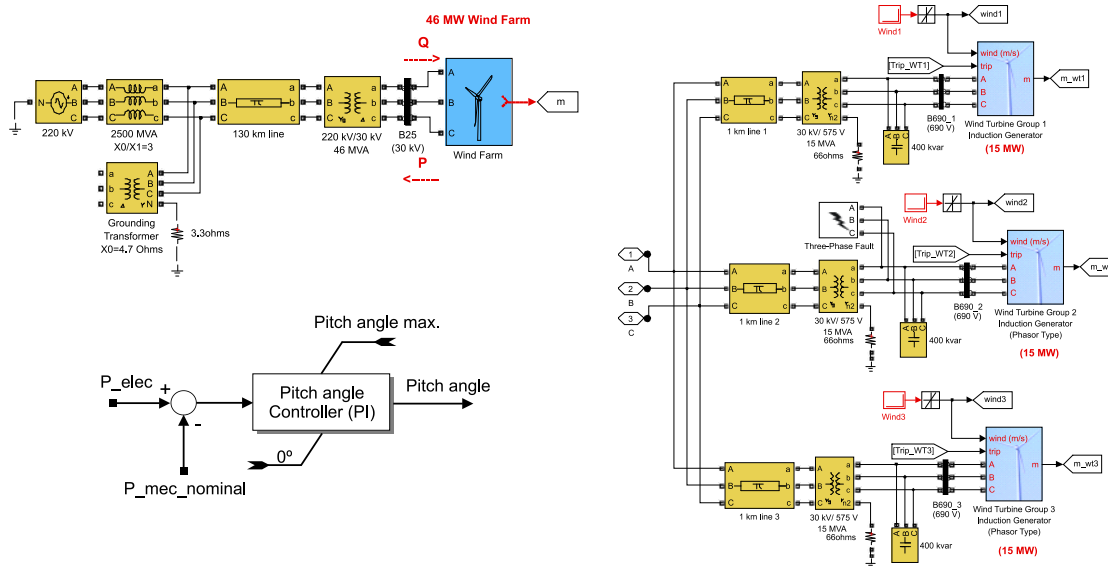
4. IMPACTO SOBRE EL SISTEMA ELÉCTRICO PARAGUAYO

Entre las ventajas asociadas a la implementación de este tipo de tecnologías se puede afirmar de realizar una implementación de parque eólico de 46MWe, permitiría al transformador de 220kV de la estación Loma Plata operar con menos carga, lo cual redundará en beneficio del perfil de tensión de las barras del Sistema Norte. Esto permitirá disminuir además las pérdidas de origen técnico en la línea de transmisión aérea de 220kV entre las localidades de Vallemi II y Loma Plata.

5. ANALISIS MEDIANTE SIMULACIONES

Utilizando los datos obtenidos a partir del análisis realizado mediante el software RETScreen, ha sido desarrollado un análisis de mediante simulaciones utilizando la herramienta computacional MatLab/Simulink. En este entorno de simulación, los resultados son obtenidos utilizando un paso de simulación variable considerando el método de integración basado en la formula Runge-Kutta implícita

(ode23tb). El diagrama de bloques que representa el parque eólico interconectado al SIN se muestra en la parte superior de la **Figura 10 (a)**. Por simplicidad en el análisis mediante simulaciones, se considera la instalación de tres grupos de aerogeneradores (de 15MWe) suministrando una potencia total cercana a los 46MWe (calculados con el software RETScreen) conectados a una barra de salida de 30kV para posteriormente exportar potencia sobre una línea de 220kV en un tramo de 130 km, desde el parque eólico instalado en la localidad de La Patria hasta la estación Mariscal Estigarribia. Las turbinas eólicas utilizan generadores de inducción de jaula de ardilla (IG) y la potencia reactiva absorbida por cada generador de inducción es compensada por un banco de capacitores (400kvar por grupo de 15MWe) conectado a una barra de baja tensión (B690) como se muestra en la **Figura 10 (b)**. El estator del generador es conectado directamente a la red eléctrica de 50 Hz. El rotor de generador es acoplado a la turbina eólica de velocidad variable. La velocidad de la turbina es controlada mediante el ángulo la inclinación de las aspas de manera a limitar la potencia de salida de los generadores a su valor nominal. Un controlador Proporcional-Integral (PI) es utilizado para controlar el ángulo de las aspas de los aerogeneradores a fin de limitar la potencia eléctrica de salida a la potencia mecánica nominal. El diagrama de bloques del controlador PI se muestra en la parte inferior de la **Figura 10 (a)**

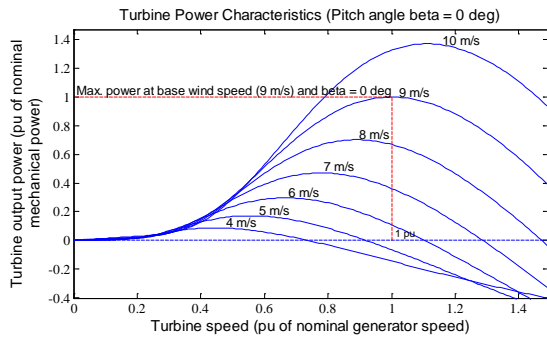


(a) Superior. Esquema general. Inferior. Diagrama del control PI del ángulo de las aspas. **(b)** Turbinas eólicas agrupadas en tres grupos de 15MWe.

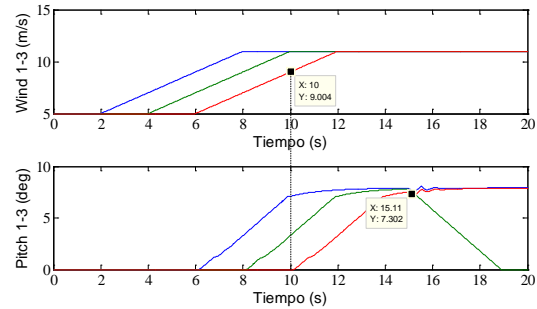
Figura 10: Diagrama de bloques del Parque Eólico interconectado al SIN.

Las curvas características de que describen la variación de la potencia mecánica como función de la velocidad de la turbina para velocidades de vientos comprendidas en un rango de 4m/s a 10m/s se muestra en la **Figura 11 (a)**. Puede apreciarse en esta figura que la velocidad del viento nominal para ceder la potencia mecánica nominal (1pu = 15MWe) es de 9 m/s.

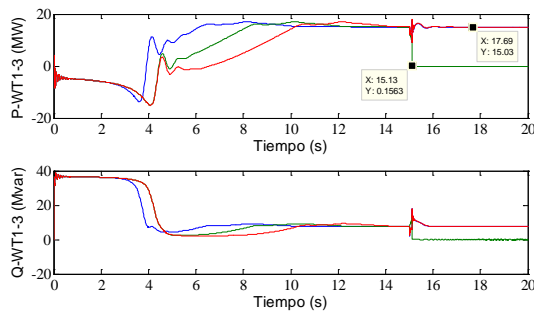
XI SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014



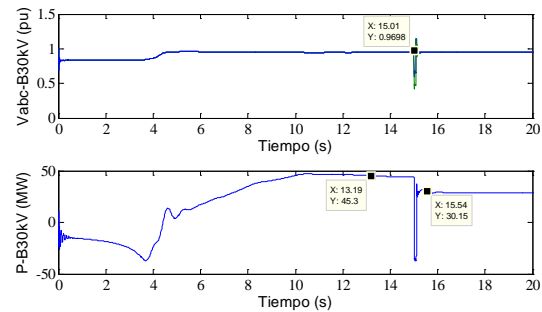
(a) Curva característica de la turbina eólica para un ángulo de las aspas de 0°.



(b) Variación de la velocidad del viento y su efecto sobre el ángulo de las aspas.



(c) Potencia activa y reactiva de los tres grupos de aerogeneradores de 15MWe.



(d) Evolución de la tensión y la potencia activa sobre la barra de 30kV.

Figura 11: Análisis mediante simulaciones del esquema propuesto interconectado al SIN.

Con el propósito de verificar los resultados al considerar el escenario realista de velocidades de vientos variables fluctuando sobre la velocidad promedio medida en la localidad de La Patria (equivalente a 7m/s), se ha simulado la respuesta del sistema eólico verificando las tensiones sobre la barra de 30kV, bajo condiciones de vientos variables. Inicialmente, la velocidad del viento aplicada a cada grupo de turbinas es fija y equivalente a 5m/s, posteriormente, a partir de un tiempo igual a 2 segundos (para el caso particular del Grupo 1) la velocidad del viento es incrementada desde 5m/s hasta 11m/s en un intervalo de tiempo de 3 segundos. La misma ráfaga de viento es aplicada a las turbinas del Grupo 2 y Grupo 3, con 2 y 4 segundos de retraso, respectivamente, tal como se muestra en la **Figura 11 (b)**. Puede apreciarse además en esta figura que las aspas se mantienen constantes con una inclinación de cero grados cuando la potencia eléctrica de salida medida se encuentra por debajo de su valor nominal. Cuando la potencia de salida se incrementa por encima de su valor nominal por efecto de un aumento de la velocidad del viento el controlador PI actúa sobre la variable de control (ángulo de las aspas de los aerogeneradores) a fin de compensar el aumento de potencia manteniendo la potencia de salida controlada sobre su valor nominal (15MWe por Grupo), conforme se muestra en la **Figura 11 (c)**.

A fin de verificar el efecto que introduce una falla temporal de funcionamiento de un Grupo de turbinas, se ha simulado además el efecto de un fallo sobre los terminales de baja tensión (ver **Figura 10 (b)** bloque, *Three-Phase Fault*) sobre el Grupo 2 de turbinas, aplicada en un tiempo $t = 15$ segundos. Puede apreciarse en la **Figura 11 (c)**, que bajo estas condiciones de operación el Grupo 2 se protege automáticamente dejando de aportar potencia activa y reactiva sobre la barra de 30kV. Finalmente, en la **Figura 11 (d)**, se muestra la evolución de la tensión sobre la barra de 30kV donde puede apreciarse que bajo condiciones normales de funcionamiento la tensión de la barra es cercana a los 0.97 pu. Puede observarse además la evolución de la potencia total sobre la barra de 30kV donde puede observarse que a los 10 segundos la potencia interconectada a la red es máxima (cercana a los 46MWe) y al momento de registrarse la falla temporal la potencia se reduce aproximadamente a 30MWe por efecto de la protección de los aerogeneradores que conforman el Grupo 2.

6. CONCLUSIONES

Assumiendo las consideraciones que han sido puestas de manifiesto en el presente artículo, con respecto a la potencia instalada (46MWe) y la cantidad de aerogeneradores (20 aerogeneradores de 2.3MWe), se estima una inversión total de unos US\$ 110,000,000. Considerando un aporte propio del emprendimiento de unos US\$ 20,000,000., se requeriría una financiación externa de unos US\$ 90,000,000. En el monto de las inversiones mencionadas anteriormente, se han considerado los beneficios que otorga la Ley N° 60/90 sobre el fomento de las inversiones. Para este tipo de proyectos basados en energías renovables y eficiencia energética existen fondos con tasas de interés muy bajas y plazos de pago flexible y largos. Para los cálculos de rentabilidad se ha contemplado un interés del 1% anual y una gracia de 2 años.

Del análisis realizado se desprende que la inversión necesaria para la puesta en operación del parque eólico de 46MWe, sería amortizada por la venta de energía bajo un precio de venta de 200US\$/MWh, el equivalente a US\$ 21,000,000. anuales. Por otro lado, tratándose de un proyecto de energía renovable podría beneficiarse del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Sin embargo, dado que el mismo se encuentra actualmente paralizado por los países participantes del tratado de Kyoto, hasta tanto que se ratifique los acuerdos de DOHA de 2012, no sería posible la emisión y comercialización de bonos de carbono. Teniendo este punto como antecedente la viabilidad económica podría sustentarse en el Mercado Voluntario Certificado de Emisiones Reducidas CER's, el cual contempla un valor de 3 US\$/TonCO₂ [7]. Si se considera como línea de base una central térmica de la misma potencia (46MWe) utilizando gas natural como fuente de energía, se podría generar un ingreso anual adicional de unos US\$ 235,000. Adicionalmente, en el mercado internacional para proyectos de este tipo se consideran subsidios por parte del estado como incentivos de alrededor de 15 US\$/MWh, lo cual representa un ingreso adicional que podría eventualmente amortizar la inversión en un tiempo prudencial, totalizando de esta manera un ingreso anual de US\$ 23,000,000. Para un factor de planta del 25% las inversiones podrían ser amortizadas en un plazo de 10 años resultando en un TIR del 8,23% y un VAN de US\$ 89,000,000., tomando el mismo criterio anteriormente mencionado. Finalmente, para un factor de planta del 50%, se tendría un ingreso total anual de US\$ 44,000,000., y las inversiones podrían ser amortizadas en un plazo de 4 años resultando en un TIR del 26,08% y un VAN de US\$ 396,000,000. Este análisis demuestra la factibilidad del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] A. Brizuela, J. Benítez y M.E Castell, el recurso eólico en Paraguay, fondo argentino de cooperación horizontal el Instituto Nacional de Tecnología y Normalización, Dirección Nacional de Aeronáutica Civil, 1997.
- [2] M. Villarrubia, Energía Eólica, cap3 pág. 70 y pág. 90, Ediciones CEAC, 2004.
- [3] DINAC, Dirección Nacional de Aeronáutica Civil, 2013.
- [4]Página web visitada www.evwind.com/2013/04/22/eolica-en-bolivia-primera-torre-de-medicion-para-impantar-parque-eolico-en-tarija.
- [5] ANDE, Plan Maestro de la Administración Nacional de Electricidad, 2013-2023.
- [6].Situación de las Energías Renovables en Paraguay, Cooperación Alemana al desarrollo, marzo 2011.
- [7].EU. ETS Carbon price. Thompson Reuters Point Carbon, 2013.