

## Ponencia para el Evento SELASI 2009

### Resumen

Título: Solución técnica y diseño del esquema eléctrico de acoplamiento del Parque Eólico del Vial Sur de Camagüey de 30 MW con el SEN.

Autor Principal: **Hernández Veloz, Joel**

Institución: **OBE Provincial Camagüey, UEB Generación Distribuida.**

País: Cuba

Correo electrónico: [joel@eleccmg.une.cu](mailto:joel@eleccmg.une.cu)

Luego de realizar mediciones del viento en diferentes puntos del país, entre los más interesantes por sus condiciones se encuentra El Vial Sur de Camagüey. En la zona mencionada el factor de capacidad supera los 33.77 %, un valor considerado de muy bueno por el aprovechamiento del aerogenerador de la energía del viento en un año.

Después de la selección del tipo de aerogenerador surge una problemática, la interconexión al SEN del Emplazamiento.

El presente trabajo aborda el cálculo de los elementos del SEN que se interrelacionan con el Parque:

Cálculo de las corrientes por circuitos y selección del conductor, subestaciones eléctricas, diseño del sistema de tierras del parque, cálculo de pérdidas de potencia y caídas de voltaje, análisis del comportamiento de las líneas de subtransmisión de enlace del Parque y el efecto de la penetración eólica en la zona. Además se calcula la energía producida en un año, CO<sub>2</sub> dejado de emitir y toneladas de combustibles dejada de consumir.

Luego de terminar el análisis se plantean las variaciones necesarias en el sistema eléctrico y se diseña el monolineal que permita mayor flexibilidad y aprovechamiento energético.

Con el apoyo de esta investigación se facilitarían mucho la ejecución de los trabajos de conexión al SEN, ahorrándole tiempo y

recursos al país en el impulso del desarrollo de las Energías Renovables, además de dar una visión de las ventajas que implicaría una instalación en la zona, de las cuales se puede determinar la amortización de la inversión.

#### Abreviaturas:

SEN ----- Sistema Electroenergético Nacional Cubano

SELASI----- Seminario Euro-Latinoamericano en Sistemas de Ingeniería

#### Finalidad del Seminario según el trabajo presentado:

Energías Alternativas y Eficiencia Energética

#### Área Temática relacionada con la Ponencia:

Optimización del aprovechamiento energético y de las energías alternativas.

## Introducción

El trabajo presentado, centrara su atención a realizar un estudio de todos los elementos que intervienen con la interconexión del Parque Eólico con el SEN. Se analizan en el mismo todos estos elementos eléctricos, desde la salida de cada aerogenerador hasta la Subestación de acople con el SEN, por donde se va a realizar la penetración eólica.

En el mismo se seleccionan todos los elementos, se calculan las pérdidas y caídas de voltaje, las corrientes de cortocircuitos de las subestaciones de distribución cercanas al Emplazamiento, y al final se varían las coordinaciones existentes en las protecciones primarias de las subestaciones que van a ser alimentadas por los aerogeneradores.

Otra tarea importante de este trabajo es el calculo y diseño del sistema de aterramiento del parque, desde las torres de las maquinas, las subestaciones eléctricas y la malla de tierra general.

El diseño del esquema monolineal eléctrico del parque con el SEN, es uno de los objetivos del presente trabajo. Creando un monolineal que haga lo mas flexible posible el enlace del parque con el SEN, además de hacer lo mas eficiente posible la entrega de energía al SEN

Materiales y Métodos

Características técnicas fundamentales de los aerogeneradores a instalar

Diámetro ---- 87 m  
Potencia nominal—2.0 MW

Área de barrido --- 5.945 m<sup>2</sup>      Voltaje Nominal ----- 690 volt  
Número de palas ---- 3  
Frecuencia -----60 Hz  
Velocidad de rotación ---- 9 a 19 r.p.m      Factor de Potencia ---- 0.98

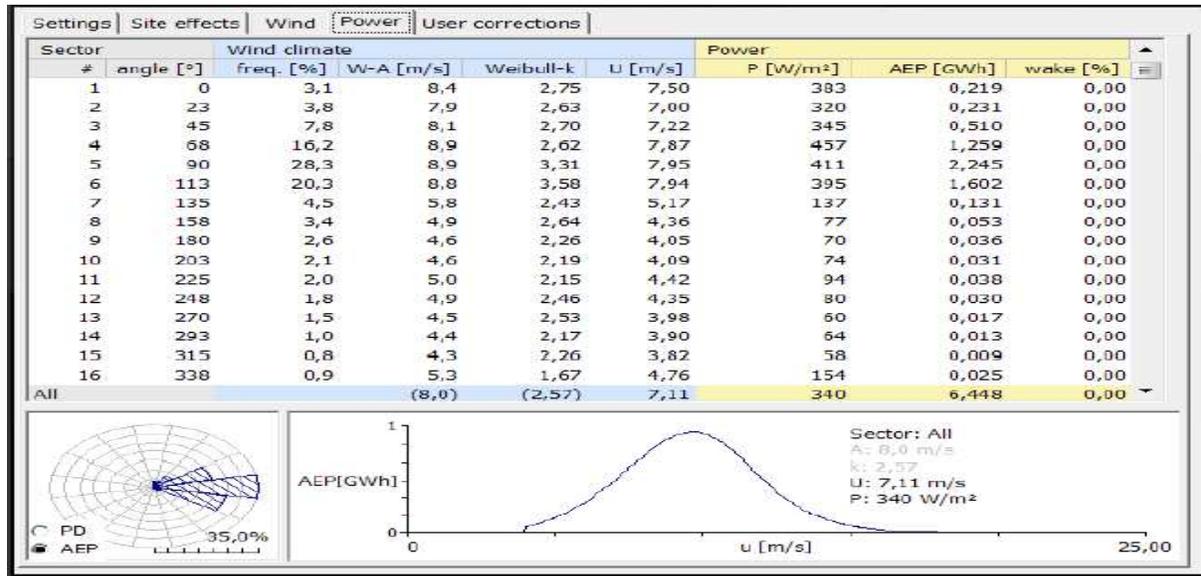


Figura 1. Distribución de Weibull y rosa de los vientos de la Gamesa 2.0 respecto a la zona a montar.

-Propuesta del esquema eléctrico interno de enlace entre aerogeneradores.

Teniendo en cuenta que los aerogeneradores se van a situar en una fila, que su diámetro es de 87 m y su distancia entre sí será igual a:  
Distancia entre generadores = 3 X diámetro = 3 X 87 = 261 metros

Decidimos dividir en tres grupos de cinco aerogeneradores, conectados entre sí, y

tributando a una celda que los enlace una barra común.

Cada tramo de conductor entre aerogeneradores se determino según su corriente nominal máxima, calculada siempre para los vientos de trabajo nominal de la máquina, es decir para 17 m/s. Los cálculos fueron realizados para cable de aluminio de 36 Kv.

$$P = 1.73 \times U \times I \times \cos \phi \quad I_n = P / 1.73 \times U \times \cos \phi$$

Tabla 1. Circuito # 1 Selección de conductores.

De torre	A torre	Aerogeneradores	Sección	I nominal	Km. cables
1	2	1	95 mm <sup>2</sup>	35.7 A	0.783
2	3	2	95 mm <sup>2</sup>	71.5 A	0.783
3	4	3	95 mm <sup>2</sup>	107.26 A	0.783
4	5	4	95 mm <sup>2</sup>	143.01 A	0.783
5	Subestación	5	150 mm <sup>2</sup>	178.76 A	2.4

Tabla 2. Circuito # 2 Selección de conductores.

De torre	A torre	Aerogeneradores	Sección	I nominal	Km cables
6	7	1	95 mm <sup>2</sup>	35.7 A	0.783
7	8	2	95 mm <sup>2</sup>	71.5 A	0.783
8	9	3	95 mm <sup>2</sup>	107.26 A	0.783
9	10	4	95 mm <sup>2</sup>	143.01 A	0.783
10	Subestación	5	150 mm <sup>2</sup>	178.76 A	1.61

Tabla 3. Circuito # 3 Selección de conductores.

De torre	A torre	Aerogeneradores	Sección	I nominal	Km cables
11	12	1	95 mm <sup>2</sup>	35.7 A	0.783
12	13	2	95 mm <sup>2</sup>	71.5 A	0.783
13	14	3	95 mm <sup>2</sup>	107.26 A	0.783
14	15	4	95 mm <sup>2</sup>	143.01 A	0.783
15	Subestación	5	150 mm <sup>2</sup>	178.76 A	2.4

Pérdidas de potencia y caídas de voltaje en los cables soterrados

$$-\Delta V = 1.73 \times I \times \text{Long} \times (R \cos\phi + X \sin\phi)$$

$$-\Delta P = 1.73 \times \Delta V \times I \times \cos\phi$$

Para V=17 m/s y P= 2.0 MW

Tabla 4. Circuito # 1 Cálculo de pérdidas de potencia y caídas de voltaje.

De torre	A torre	Km cables	Resistencia	Reactancia	Caída de voltaje	Pérdidas de potencia
1	2	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.020 Kv	0.0012 Kw
2	3	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.077 Kv	0.0093 Kw
3	4	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.116 Kv	0.021 Kw
4	5	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.154 Kv	0.037 Kw
5	Subestación	2.4	0.262 Ω	0.112 Ω	0.490 Kv	0.149 Kw
Total		5.53	-	-	0.406 Kv	0.857 Kw

Tabla 5. Circuito # 2 Cálculo de pérdidas de potencia y caídas de voltaje.

De torre	A torre	Km cables	Resistencia	Reactancia	Caída de voltaje	Pérdidas de potencia
6	7	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.020 Kv	0.0012 Kw
7	8	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.077 Kv	0.0093 Kw
8	9	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.116 Kv	0.021 Kw
9	10	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.154 Kv	0.037 Kw
10	Subestación	1.61	0.262 Ω	0.112 Ω	0.261 Kv	0.079 Kw
Total		4.74	-	-	0.518 Kv	0.628 Kw

Tabla 6. Circuito # 3 Cálculo de pérdidas de potencia y caídas de voltaje.

De torre	A torre	Km cables	Resistencia	Reactancia	Caída de voltaje	Pérdidas de potencia
11	12	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.020 Kv	0.0012 Kw
12	13	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.077 Kv	0.0093 Kw
13	14	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.116 Kv	0.021 Kw
14	15	0.783	0.403 Ω	0.12 Ω	0.154 Kv	0.037 Kw
15	Subestación	2.4	0.262 Ω	0.112 Ω	0.490 Kv	0.149 Kw
Total		5.53	-	-	0.406 Kv	0.857 Kw

$$I_{cc} = E_{pu} / Z_{pu} \times I_{base}$$

$$Z_B = V_B^2 / MVA \quad Z_B = 11.9$$

$$E_{pu} = 1$$

$$Z_{pu} = Z_{real} / Z_B = 1$$

$$I_B = MVA / 1.73 V_B$$

$$I_B = 1667 \text{ A}$$

$$MVA_B = 100 \text{ MVA}$$

Tabla 7. Cálculo de corrientes de cortocircuitos en subestaciones de distribución.

Subestaciones	Potencia Nominal	Voltaje Primario	Voltaje Secundario	Icc 3 Ø
Santa Lucia	2.5 MVA	34 KV	13.8 KV	1050 A
Mayanabo	2.5 MVA	34 KV	13.8 KV	910 A
San Fernando	2.5 MVA	34 KV	13.8 KV	2136 A
Parque Eólico	30 MVA	34 KV	-	4356 A

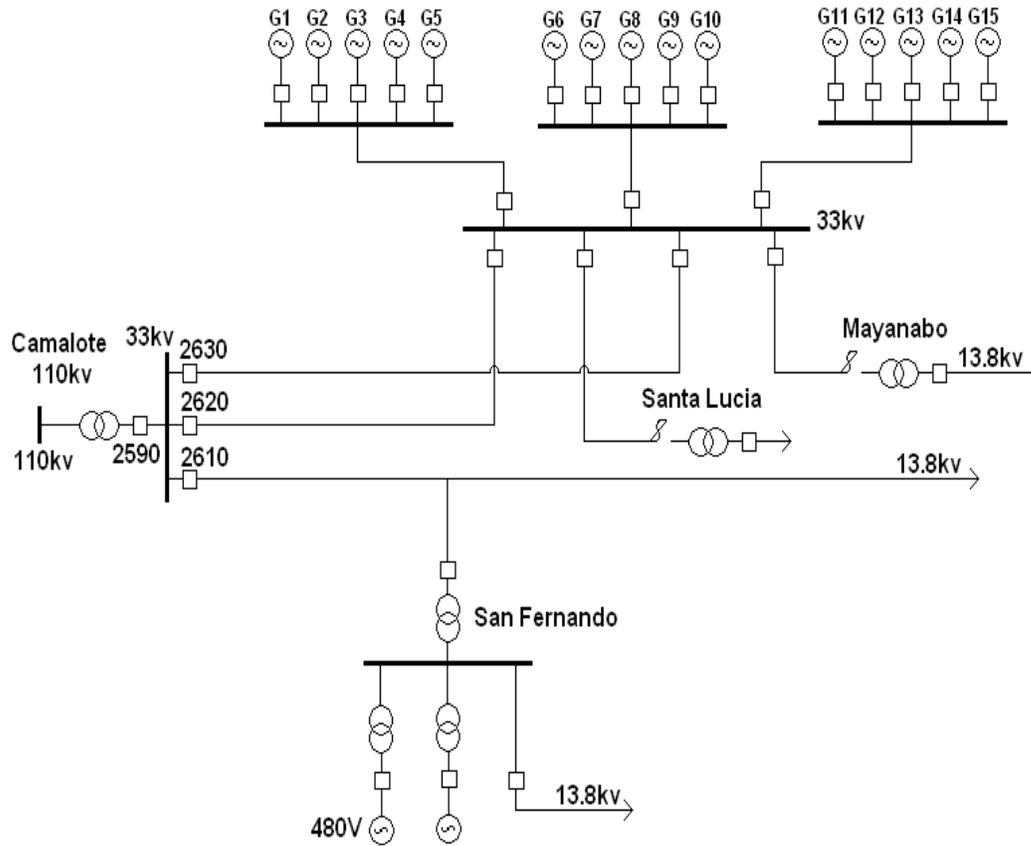


Figura 2. Monolineal de la subestación de enlace de Parque

- Los aerogeneradores se enlazan en grupos de cinco, tributando a una barra común, mediante un interruptor totalizador.
- Mediante dos interruptores de 34 kV se alimenta de manera directa la distribución de Santa Lucia, a solo 3 Km. de la carga, pudiendo aportar al Polo en el estado actual cerca de 2.5 MW de potencia. Esta demanda debe aumentar con el desarrollo del turismo en la zona.
- Los otros dos interruptores que entran a la barra de 34.5 kV, son los que enlazan al Emplazamiento con el SEN. Los mismos no solo alimentan la barra, sino que toda la Potencia que no sea consumida en la Playa, se transmite hacia la Subestación de 110/34.5 kV de Camalote.
- En la línea del 2610 tenemos el grupo Electrónico de diesel, el cuál se verá beneficiado cuando sea transmitida potencia a la barra de Camalote, pudiendo en ocasiones la generación eólica asumir el trabajo de este grupo. Esto traería un considerable ahorro de combustible diesel, alargaría la vida útil de los motores, además de dejar de emitir cargas contaminantes a la atmósfera.

## Cálculo y diseño del sistema de tierra del Parque Eólico.

### Diseño de puesta a tierra de los aerogeneradores

El diseño del sistema de puesta a tierra se compone de un anillo de 4.2 m de diámetro ubicado en la base con dos varillas o picas de 2 m de largo a 1 m de distancia del anillo a 1 m de profundidad y el otro anillo de 3.5 m ubicado dentro de la base en su parte inferior.

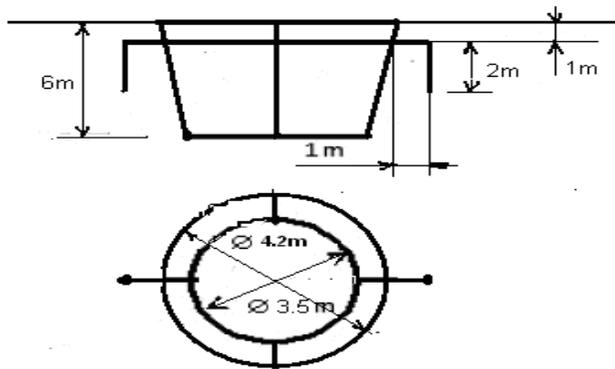


Figura 3. Esquema de la malla de tierra de cada torre.

Utilizando el cálculo por el programa para un círculo a la profundidad de 1 m con dos electrodos verticales se obtienen los siguientes resultados:

- Resistividad de suelo capa superior, 18.70 Ohm/m
- Espesor de la capa superior, 7.00 m
- Resistividad de suelo capa inferior, 18.70 Ohm/m
- Máxima corriente de falla a tierra, 4356 A
- Tiempo máximo de limpieza de la falla, 0.50 seg.
- Longitud de electrodo horizontal, 11.00 m
- Diámetro del electrodo horizontal, 0.0160 m

- Cantidad de electrodos horizontales, unidades 1
- Longitud de electrodo vertical, 2.00 m
- Diámetro del electrodo vertical, 0.0160 m
- Cantidad de electrodos verticales, unidades 2
- Resistividad de la superficie, 500.00 Ohm.m
- Corriente de rayo, 10.0 kA

### Resultados

- Resistencia de tierra del sistema, 1.59 Ohm
- Resistencia de impulso del sistema, 1.89 Ohm

### Diseño de la malla de tierra de la subestación eléctrica.

- Se compone de un circuito alrededor del contenedor con 6 electrodos verticales de 2 m de largo aterrados a 1 m de profundidad. Se garantizan, como mínimo, sus conexiones entre el contenedor y el SPA.
- Aunque el cálculo demuestra los valores de voltaje de paso y de contacto son favorables, es recomendable a 0.5 – 1.0 m de profundidad adicionar el circuito de atenuación del gradiente del potencial sobre la superficie del suelo cubierto con la gravilla

### Resultado del cálculo de la malla de la subestación.

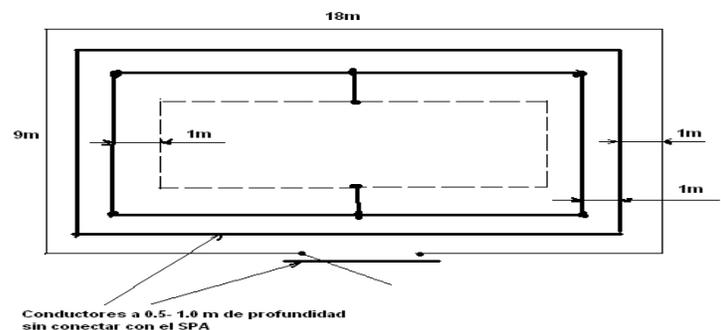


Figura 4. Malla de tierra de la subestación eléctrica.

- Máxima corriente de falla a tierra, 4356 A
- Tiempo máximo de limpieza de la falla, 0.5 Seg
- Área de terreno disponible, cuadrados 70 m
- Tiempo máximo de limpieza de la falla, 0.5 Seg
- Resistividad de la primera capa del terreno, 18.70 Ohm/m
- Resistencia de tierra esperada calculada, 0.98 Ohm
- Resistencia de tierra esperada empírica, 1.07 Ohm
- Coeficiente de impulso para la corriente de rayo de 10 kA 0.82
- Resistencia de impulso calculada, 0.82 Ohm
- Cable de unión del sistema de tierra entre los aerogeneradores y la subestación:
- Conductor de cobre de 150 mm, 15,806 Km.

#### Resultados y Discusiones

Luego de realizar todos los cálculos necesarios para la selección de los elementos de enlace del parque, verificar que las selecciones estuvieran en parámetros, y saber los valores de Icc de las subestaciones de distribución. El diseño del monolineal es un importante paso, ya que nos da flexibilidad en la operación, nos permite cubrir la demanda de la Playa, y nos da la posibilidad en ocasiones de asumir la distribución que alimenta el Grupo Electrónico de diesel, ahorrándole al país toneladas de combustible diesel al año, al suplir la demanda de los consumidores con energía renovable. Esto además

disminuye las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y alarga la vida útil de los motores, los que no se verán forzados a trabajar largas jornadas.

Otro importante aspecto es la nueva coordinación de las protecciones primarias de las subestaciones de distribución vinculadas directamente al Parque, dándole confiabilidad al SEN.

Teniendo en cuenta que estas subestaciones de Distribución están solo a 3 Km del interruptor de salida de la subestación del Parque Eólico, se dejan rígidas las protecciones primarias del transformador de fuerza, el que quedara protegido por el interruptor de salida del Parque, siempre con la condición que los 3 Km de líneas estén Certificados.

En el monolineal propuesto, se busca el mayor nivel de flexibilidad del sistema, y se logra el mejor aprovechamiento de la energía eólica, consumiendo una parte de la misma muy cerca de la instalación, y alternando también con la distribución del grupo Diesel. La colocación de 4 interruptores en la Barra de salida del Emplazamiento, evita que al existir disparos en las líneas de Camalote al Parque, colapse todo el sistema, de esta manera dos interruptores velaran por la distribución, y los otros dos servirán de enlace entre el Parque Eólico y el SEN.

Con la presencia del Emplazamiento, se dejarían de emitir gases invernaderos, y el sistema híbrido formado le ahorraría toneladas al año de diesel al país.

Energía generada año =  $30 \times 8760 \times 0.34$   
= 89352 MWh/año

Gases dejados de emitir =  $89352 \times 0.75$  =  
67014 ton CO<sub>2</sub>

Ahorro de combustibles =  $89352 \times 1000 \times$   
 $350 / 1000000$  = 31273.2 Ton



## Conclusiones

La selección y cálculo de los elementos que intervienen en la interconexión del futuro Parque Eólico del Vial Sur de Camagüey, nos da elementos claves en el montaje eléctrico y para la futura explotación del mismo de la manera más eficiente y confiable posible. Este trabajo no solo valoro los elementos nuevos a introducir en el SEN, sino también la interacción de todos los ya existentes, que de una forma u otra tienen una correlación directa en el funcionamiento del Parque, en muchos casos hubo que realizar variaciones en los mismos, para evitar disparos innecesarios de los circuitos de distribución que serán alimentados por el Emplazamiento. La variante de interconexión planteada, posibilita que toda el área del Polo Turístico pueda cubrirse con la generación eólica, eliminando antiguas pérdidas debido a la cercanía existente de la generación y la carga, teniendo en cuenta que actualmente Santa Lucia se alimenta de una subestación alejada unos 30 km. Otro aspecto de interés fue que se tuvo en cuenta la línea que alimenta el Grupo Electrógeno de Diesel, el cual en varias ocasiones va a ser asumido por la generación eólica, alargándole la vida útil a los motores y ahorrándole al país cuantiosas sumas de divisas por concepto de Diesel dejado de consumir, aprovechando la posibilidad mediante el esquema seleccionado de conformar un sistema híbrido que garantice la generación del poblado de Camalote.

Las condiciones de los parámetros de viento en la zona son muy buenas, no obstante siempre que se decida montar un Parque Eólico no debe ser la razón que lo determine. Siempre este tipo de instalación debe responder a resultados que aporten al país o región donde se instalen, y siempre buscar las opciones en las cuales la instalación se haga más atractiva en términos económicos. Eso fue en definitiva lo que se planteo en este trabajo en cuanto al aprovechamiento energético de los aerogeneradores.

## Reconocimientos

- Al Profesor Conrado Moreno Figueredo por los conocimientos transmitidos durante el diplomado.
- Al Ing. Salvador Solanas Fernández por su colaboración en la confección de la parte técnica del presente trabajo.
- Al equipo de trabajo de Energía Renovables de INEL, y en especial a Guillermo Leiva Viamonte por toda la documentación facilitada, y trabajos referentes al Vial Sur realizados.
- Al V Congreso Internacional SELASI 2009, por servirme de inspiración e interesarse por mi trabajo.

## Referencias

- [1]. Polígono Industrial Agustinos, C/A, Gamesa Eólica. [Online]. Available:<http://www.gamesa.es>
- [2]. Real Decreto 3275/1982 del 12/11, sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación.
- [3]. Libro de las Diez Preguntas, Como se proyecta un Parque Eólico, Pág. 153-161,2006.
- [4]. Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica. Capítulo 7, Instalaciones Eléctricas de Parques Eólicos.
- [5]. Utilización como herramienta de calculo para el diseño y calculo del sistema de tierras del Parque, del MATLAB 7.
- [6]. Seminarios impartidos en el II diplomado de Energía Eólica, impartido en la Habana, Cuba.
- [7]. Sistemas Eléctricos, Método en por unidad.

## Biografía del Autor:



Mi nombre es Joel Hernández Veloz, tengo 29 años de edad y soy graduado de Ing. Electricista de la Universidad de Camagüey, Cuba.

En el año 1997 me gradué de Técnico Medio en Sistemas Eléctricos Industriales, al finalizar el tecnológico me ubicaron de prácticas en la Empresa Eléctrica de Camagüey, en una Brigada de Mantenimiento a Subestaciones de Transmisión y Subtrasmisión. Debido a mi actitud ante el trabajo me ofrecieron 8 meses mas tarde una plaza como operario de la brigada, donde me desempeñe por 4 años. A la par de mi trabajo comencé mis estudios superiores en la carrera de Ingeniería Eléctrica, en la Universidad de Camagüey.

En el quinto año de mi carrera, el Dpto. de la Empresa me ofrece la plaza de Especialista en Equipos Primarios de Alto Voltaje, plaza que ocupe por tres años aproximadamente. Luego comencé a trabajar como Despachador de Carga Eléctrica, alrededor de un año.

Después de este ultimo puesto de trabajo, la dirección de la Empresa me selecciono junto a otro Ingeniero, para pasar un curso de entrenador de Motores de Combustión Interna, utilizados en la Generación de electricidad (Grupos electrógenos), en la Fabrica MAN que se encuentra en Ausburgo, Alemania. El curso lo termine con excelentes resultados.

Al regresar al país me dieron la tarea de montar dos Plantas de Fuel-Oil de 27,2 MW de tecnología HYUNDAI. En estos momentos me desempeño como Jefe de este tipo de Generación en la Provincia de Camagüey.

Actualmente soy el representante en mi Provincia de un ambicioso programa de prospección eólica, con el objetivo de instalar alrededor de 140 MW de Energía Eólica, resultado de parte de mi trabajo es el presentado a SELASI, como Interconexión de uno de los Parques eólicos que se montaran en mi Provincia con el Sistema Electroenergético Nacional.

El trabajo presentado anteriormente es la base de mi Tesis de Maestría en Energía Eólica, desarrollado en la Habana, Cuba en el actual año. El mismo fue presentado y discutido en el CIER (Congreso Internacional de Energías Renovables), celebrado en el Palacio de las Convenciones de la Habana, el pasado mes de Junio.