

Diseño de una microred híbrida a base de energía fotovoltaica y energía térmica diesel para reducir la contaminación ambiental.

Galo Xavier Álvarez Yanchapanta ¹, Héctor Israel Vaca Vallejo ¹

1. Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga

gx_alvarez@hotmail.com, israelvacav.electromechanicali@gmail.com

Resumen— Actualmente en el mundo, el uso de energías renovables no convencionales que ayudan a preservar el medio ambiente es un tema que va a la par con el concepto de generación distribuida donde las redes eléctricas deben garantizar en todo momento disponibilidad de suministro eléctrico, por lo cual se ha hecho énfasis en el desarrollo de microredes para que de esta manera los consumidores no sean dependientes de un solo suministro de energía sino más bien puedan tener varias alternativas disponibles y garantizar de esta manera un sistema eléctrico más confiable, flexible, accesible y económico.

Palabras clave: red, microred, generación distribuida, energías renovables.

I. INTRODUCCIÓN

El presente artículo trata acerca de las microredes que son básicamente una red de distribución a pequeña escala y en baja tensión. Como tal, dispone de los mismos elementos de una red convencional, generadores, cargas y dependiendo el caso sistemas de control, añadiendo además la posibilidad de incluir dispositivos de almacenamiento de energía. Sin embargo, aunque conceptualmente todos estos equipos tienen las mismas funciones que en una red a gran escala, su funcionamiento y especialmente sus sistemas de control y protección deben estar adaptados para operar adecuadamente de acuerdo con la filosofía de funcionamiento de las microredes.

Por otro parte el incremento exponencial de la demanda eléctrica así como requerimientos de calidad de suministro cada vez más exigentes han obligado a que paulatinamente se avance hacia un nuevo concepto de red eléctrica. A diferencia de las redes eléctricas tradicionales las microredes forman parte de los sistemas de distribución integrando generadores independientes de pequeña escala pertenecientes a los usuarios los cuales trabajan de manera autónoma para abastecer parte o la totalidad de su demanda reduciéndose así los costos de consumo, mejorando al mismo tiempo la eficiencia y la confiabilidad del sistema. De la misma manera, las microredes favorecen la integración de sistemas de energías renovables y de almacenamiento.

En otras palabras se tratan de sistemas híbridos formados por la integración de varios sistemas de generación, tanto convencionales como de origen renovable, con objeto de garantizar una base de continuidad y fiabilidad en el suministro eléctrico.

El presente trabajo de investigación contribuirá con la implementación de una microred híbrida en la empresa Trace Oilfield Services Cia. Ltda., dando respuesta a las necesidades de la empresa de contar con un servicio continuo de energía eléctrica.

II. MARCO TEÓRICO

A. Generación Distribuida.

El concepto de Generación Distribuida (GD) ha surgido en los últimos años debido a la evolución que ha tenido el sistema eléctrico. Su definición se puede aproximar a la de generación de energía eléctrica a pequeña escala y a cortas distancias del consumidor [1].

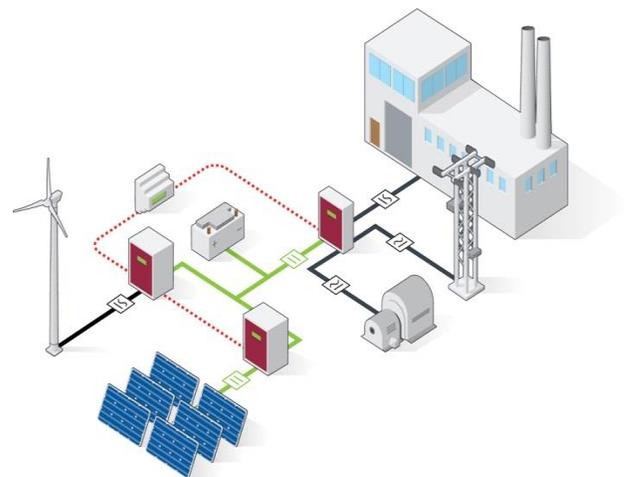


FIGURA 1.
Generación distribuida.

Como se puede apreciar en la figura 1 la red eléctrica está formada por varios generadores, de esta manera si en cualquiera de ellos se presenta un problema, los demás generadores se encargarán de seguir suministrando energía eléctrica a las cargas obteniendo un servicio continuo las 24 horas.

B. Componentes de una Microred.

En una microred pueden existir fuentes de almacenamiento como baterías así como también fuentes de generación tanto de energías convencionales como de energías renovables las cuales detallaremos a continuación[2]:

Generadores de Energías Convencionales.

- Motores de combustión interna.
- Turbinas de gas y micro turbinas.
- Pilas de combustible

Generadores de Energías Renovables.

- Células fotovoltaicas
- Generador eólico

C. Modos de operación de una Microred.

Una de las ventajas de las microredes es que no se limitan a trabajar únicamente conectadas al sistema de distribución sino también pueden trabajar de manera aislada.

C-I. Microred conectada al sistema de distribución.

En condiciones normales de funcionamiento, una microred estará conectada a la red de distribución eléctrica.

En esta situación no es necesario que toda la energía demandada por las cargas sea producida por los generadores de la microred ya que el desfase entre generación y consumo será cubierto por la energía que fluye a través del punto de conexión.

La microred podrá ser vista como un pequeño generador o como una carga en función de si la generación es mayor o menor que la energía demandada por las cargas. Cuando la microred trabaja conectada a la red de distribución, el sistema de control tiene como objetivo la disminución de coste de la energía para los consumidores que están asociados a ella. Usa la generación local cuando es económicamente rentable, disminuyendo la cantidad de energía que toma de la red.

C-II. Microred en modo aislado.

Como se ha comentado, una microred estará habitualmente (modo normal de operación) conectada a la red de distribución. Sin embargo, ante un fallo en esta red, es posible pasar al modo de emergencia en que la microred se desconecta, pasando a trabajar de forma autónoma.

Una vez detectado un problema en la red de distribución, se tratará siempre de que la desconexión se realice de la forma más transparente posible para las cargas conectadas. Si no es posible aislar la microred con éxito y el suministro queda afectado, se pone en marcha un procedimiento automático con el objetivo de restaurar el servicio de forma independiente de la red de distribución.

III. DISEÑO DE LA MICRORED

Con el objetivo de dar solución al problema con el que se encontraba la empresa se procedió a seleccionar los tipos de componentes que integran parte de la Microred teniendo:

- Sistema de generación fotovoltaica.
- Sistema de generación térmica diesel (Respaldo).
- Red de distribución CNEL SUCUMBOS.

Una vez seleccionados los componentes de la Microred se procede a realizar el análisis de cada uno de ellos.

A. Sistema de generación fotovoltaica.

Para la selección del sistema de generación fotovoltaico se realizó con anterioridad un estudio de la radiación solar del sector donde se implementó la microred [3].

A-I. Estudio de radiación solar.

Para el estudio de radiación solar en el sector se utilizó un instrumento de precisión (piranómetro), para poder obtener valores reales de radiación, dicho instrumento entrega una señal eléctrica de 4 a 20mA la cual con la ayuda de un controlador lógico programable (PLC) y con la ayuda del software Labview se pudo realizar la adquisición de datos durante 6 meses continuos.

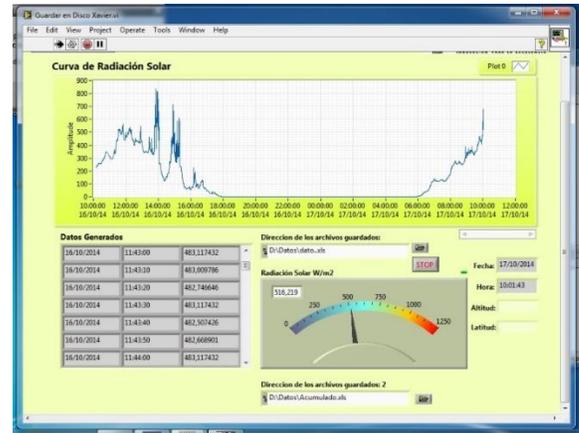


FIGURA 2.

Interfaz de la adquisición de datos de radiación solar.

El almacenamiento de datos de radiación se lo realizó cada 10 segundos obteniendo un total de 8640 datos diarios para posteriormente realizar promedios por horas y de esta manera tener un dato promedio mensual de radiación obteniendo los siguientes resultados:

TABLA I.
Datos promedio por horas de radiación solar.

Hora	ABRIL (W/m2)	MAYO (W/m2)	JUNIO (W/m2)	JULIO (W/m2)	AGOSTO (W/m2)	SEPTIEMBRE (W/m2)
6h00	0,100	0,335	0,164	0,027	0,156	0,279
7h00	24,948	29,550	22,328	18,997	23,955	32,172
8h00	102,607	115,909	90,800	100,334	102,412	139,559
9h00	218,177	245,937	191,171	179,088	208,593	245,615
10h00	356,186	388,089	285,160	290,793	330,057	386,012
11h00	462,788	482,897	350,271	358,549	413,626	455,393
12h00	594,197	597,273	445,259	376,229	503,240	494,495
13h00	617,932	616,870	500,677	489,378	556,215	592,201
14h00	569,475	570,894	473,018	466,946	520,083	527,029
15h00	523,219	497,393	370,815	431,901	455,832	429,178
16h00	374,108	369,099	271,142	255,322	317,418	321,492
17h00	224,635	207,184	172,173	168,980	193,243	190,638
18h00	65,916	57,397	65,693	57,173	61,545	71,807
Promedio Mensual	4134,287	4178,828	3238,670	3193,716	3686,375	3885,869

Otro de los métodos para poder conocer la radiación solar del sector es acudir a los estudios ya existentes por diferentes institutos dedicados a la recolección de este tipo de datos en nuestro país como el INAMHI, datos recolectados por la NASA, el Atlas Solar, y estudios realizados por la Universidad de Massachusetts.

Realizando una comparativa entre estos datos ya existentes y los obtenidos por el estudio realizado en el sector, se observa que los datos que más se aproximan a los obtenidos, es el estudio realizado por la Universidad de Massachusetts, datos que son tomados como referencia en el Código de la Construcción Ecuatoriana.

TABLA II.

Comparativa entre los estudios realizados por institutos dedicados a tomar estos dato VS. datos obtenidos en el sitio.

	Radiación Abril (kw/m2d)	Radiación Mayo (kw/m2d)	Radiación Junio (kw/m2d)	Radiación Julio (kw/m2d)	Radiación Agosto (kw/m2d)	Radiación Septiembre (kw/m2d)
Promedio Mensual Obtenido.	4,13	4,18	3,24	3,19	3,69	3,89
Promedio Mensual Atlas	4,65	4,5	4,2	4,35	4,5	4,35
Desviación con valores obtenidos.	11,09%	7,14%	22,89%	26,58%	18,08%	10,67%
Promedio Mensual Nasa	3,86	3,8	3,59	3,77	3,96	4,25
Desviación con valores obtenidos.	-7,11%	-9,97%	9,79%	15,29%	6,91%	8,57%
Promedio Mensual U. Massachusset.	4,14	4,14	3,39	3,83	3,83	3,78
Desviación con valores obtenidos.	0,14%	-0,94%	4,46%	16,61%	3,75%	-2,80%

Una vez que se tenga claro cuál es el recurso solar disponible en el sector se procede a realizar el diseño para el generador fotovoltaico.

A-II. Diseño del generador fotovoltaico.

Uno de los parámetros que hay que tener en consideración para el diseño es saber la potencia de la carga donde vamos a integrar la microred, en este caso la empresa tiene una demanda de 20KW máximo y se requiere tener un generador fotovoltaico de 8,4KWp instalados.

Los paneles solares más comerciales que se utilizan para este tipo de instalaciones son paneles de silicio policristalino, por otra parte la empresa dispone de un medidor trifásico por lo que se elige una configuración de inversores en string (un inversor monofásico para cada fase) que es mucho más confiable que la configuración de inversor central (un solo inversor trifásico) puesto que si uno de los inversores llegara a fallar los otros dos inversores seguirán funcionando [4].

Por ende el primer paso será seleccionar los inversores realizando el cálculo necesario para determinar la potencia en entrada y para la configuración en string se tiene

$$P_{c/inv} = \frac{P_{gen}}{3} \quad (1)$$

donde $P_{c/inv}$ es la potencia de entrada de cada inversor y P_{gen} es la potencia pico del generador fotovoltaico de donde se obtiene una potencia de cada inversor de 2,8KW.

El inversor seleccionado debe ser mayor a la potencia calculada, debe permitir la conexión a la red y deben ser inversores auto protegidos.

Una vez seleccionados los inversores se procede a seleccionar los módulos fotovoltaicos en base a los parámetros de potencia, corriente y tensión de entrada a los inversores (3,2KW, 18A máx. y 125-500Vdc respectivamente).

En base a los parámetros antes mencionados se eligen paneles fotovoltaicos de 280W que cumplen los requisitos antes mencionados, el número de paneles necesarios para cubrir la potencia instalada se la realiza con un cálculo sencillo dividiendo la potencia pico para la potencia de cada módulo, con lo que se obtiene un resultado de 30 módulos fotovoltaicos.

Posteriormente se procede a realizar el diseño para la distribución de los paneles conectados en serie y paralelo

$$N_{max_serie} = \frac{V_{max\ inv}}{V_{ca\ mod}} \quad (2)$$

donde, N_{max_serie} representa el número máximo de paneles que se pueden conectar en serie, $V_{max\ inv}$ es el voltaje máximo de entrada al inversor y $V_{ca\ mod}$ es el voltaje a circuito abierto de

cada módulo fotovoltaico; por lo contrario el número mínimo de paneles conectados en serie

$$N_{min_serie} = \frac{V_{min\ inv\ MPPT}}{V_n\ mod} \quad (3)$$

donde, N_{min_serie} representa el número mínimo que se pueden conectar en serie, $V_{min\ inv\ MPPT}$ es el voltaje mínimo de entrada al inversor para alcanzar el MPPT (Maximum Point Power Tracker) y $V_n\ mod$ es el voltaje de operación de los módulos fotovoltaicos.

De la misma manera se realiza el cálculo para el número de ramales máximos y mínimos que pueden ser conectados al inversor

$$N_{max_ram} = \frac{I_{max\ inv}}{I_{cc}(Módulo)} \quad (4)$$

donde, N_{max_ram} representa el número máximo de ramales conectados al inversor, $I_{max\ inv}$ es la corriente máxima de entrada del inversor y $I_{cc}(Módulo)$ es la corriente de corto circuito de los módulos fotovoltaicos.

Una vez realizado el cálculo del número de módulos conectados tanto en serie como en paralelo, se procede a seleccionar el arreglo adecuado para el proyecto, para nuestro caso elegimos 1 ramal con 10 paneles conectados en serie ya que con esto se obtiene un nivel de voltaje mayor a la entrada del inversor[5].

Quedando nuestro generador fotovoltaico con las siguientes características:

TABLA III.
Características del generador fotovoltaico.

Tensión de Operación	352 V
Corriente de Operación	7,95 A
Potencia Pico	2800 Wp
Numero de Inversores	3

A-III. Ángulo de inclinación de los paneles solares.

Para obtener la inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos y así poder captar la mayor cantidad de radiación posible se aplica la fórmula

$$\beta_{optima} = 3,7 + 0,69|\phi| \quad (5)$$

donde, β_{optima} representa la inclinación óptima de los paneles, y ϕ es la latitud donde se van a instalar los paneles solares de donde se obtiene que la inclinación óptima en el lugar del proyecto es de 4,057°, pero tomando en consideración la condiciones climáticas del sector es recomendable sumarle 10° para que el agua lluvia pueda evacuarse con facilidad.



FIGURA 3.
Ángulo de inclinación de los paneles solares.

A-IV. Dimensionamiento de los conductores.

El calibre o sección del conductor debe tomar en cuenta tanto la ampacidad como la caída de tensión y para el circuito de corriente continua viene dada por la fórmula siguiente

$$S = \frac{2 * L * I}{56 * \% \Delta V} \quad (6)$$

donde, S representa la sección transversal del conductor en mm^2 , L es la longitud del conductor más largo en metros, I es la intensidad de corriente que circularan por los arreglos y $\% \Delta V$ es la caída de voltaje máxima permitida.

De la misma manera para seleccionar el calibre o sección del conductor en el circuito de corriente alterna se debe tomar en cuenta que es un sistema trifásico y de igual manera que los conductores de corriente continua se deben tener en cuenta los criterios de ampacidad y caída de tensión y viene dada por la fórmula

$$S = \frac{\sqrt{3} * 2 * L * I * \cos \phi}{56 * \% \Delta V} \quad (7)$$

donde, S representa la sección transversal del conductor en mm^2 , L es la longitud del conductor más largo en metros, I es la intensidad de corriente que circularan por los arreglos, $\cos \phi$ es el factor de potencia de la red de distribución y $\% \Delta V$ es la caída de voltaje máxima permitida.

B. Sistema de generación térmica diesel.

En este caso el generador de energía térmica diesel funcionará únicamente como respaldo cuando se presente algún problema en la red de distribución eléctrica, y se encontrará disponible en cualquier momento para prestar sus servicios de forma automática sincronizándose posteriormente con el generador fotovoltaico hasta que el suministro de energía de la empresa distribuidora se restablezca dando de esta manera solución a la problemática de la empresa[6].

C. Tablero de transferencia automática.

El tablero de transferencia automático será el encargado de detectar si se presenta algún corte del servicio de energía eléctrica en la red y enviará la señal para que el generador térmico diesel arranque de manera automática tomando la carga principal de la empresa y posteriormente sincronizándose con el generador fotovoltaico para trabajar de manera aislada.

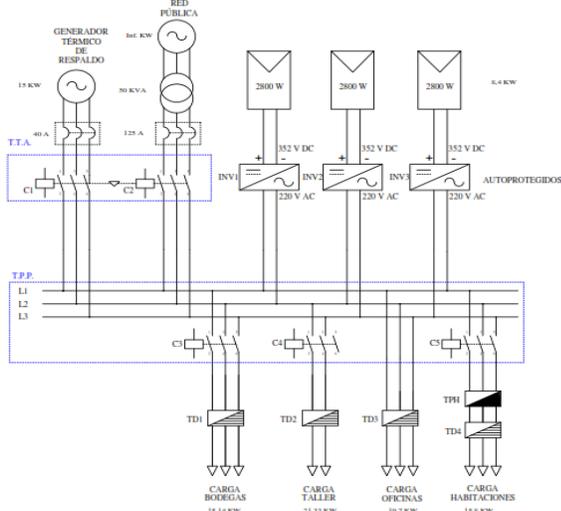


Figura 4.

Diagrama de la Micred.

Cuando el servicio de energía eléctrica ya se haya restablecido de la misma manera el tablero de transferencia lo detectará y enviará la señal al generador para que este se detenga y se realice el cambio nuevamente a la red de distribución para sincronizarse posteriormente con el generador fotovoltaico.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Después de la implementación de la micred se analiza cuanta energía se está produciendo con nuestro generador fotovoltaico y que porcentaje de ahorro representa el mismo, así como también la reducción de la emisión de CO₂ a la atmósfera por la utilización de energía renovable.

A. Producción energética del generador fotovoltaico.

La energía producida por el sistema fotovoltaico en un período mensual puede ser estimada, de forma aproximada de la siguiente manera

$$Pe = P_p * 24 \text{ horas} * 30 \text{ días} * f_p$$

donde, Pe representa la producción energética mensual, P_p es la potencia pico instalada del generador fotovoltaico, y f_p es el factor de planta para generadores fotovoltaicos que esta entre el 15% y el 20%, teniendo una producción mensual aproximada de 1000Kwh.

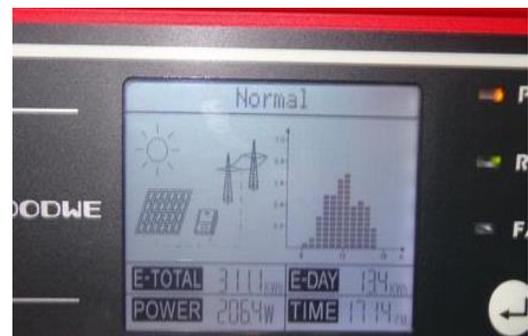


FIGURA 5.

Pantalla del inversor después del primer mes de la instalación.

Información que se corrobora después del primer mes de instalado el proyecto con la información que nos proporcionan los inversores de esta manera después del primer mes de operación el generador fotovoltaico entregó 311,1Kwh por inversor tendiendo un total de 933,3Kwh inyectados en el circuito de la empresa.

Haciendo una proyección para estimar la producción de energía anual se tiene 933,3Kwh en 12 meses de utilización del generador teniendo una producción de 11199,6Kwh o su equivalente aproximado a 11,2Mwh.

B. Ahorro de toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera.

Probablemente la característica más resaltante de la energía solar es que es limpia ya que en su producción o explotación no contamina el medioambiente de ninguna manera.

Este ahorro se puede cuantificar en toneladas de CO₂ no emitidas a la atmósfera por dejar de utilizar energía proveniente de centrales térmicas y reemplazarlas por el uso de energía fotovoltaica.

Al no consumir combustibles fósiles se está disminuyendo las emisiones de CO₂ a la atmósfera en 0,6629 tCO₂/Mwh generado, con lo que se puede realizar una estimación de cuantas toneladas de CO₂ al año se estará disminuyendo y de esta manera tenemos[7].

VII. REFERENCIAS

$$\text{Ahorro de Ton CO}_2 = EF_{grid,OM} * E_{ac}$$

donde, $EF_{grid,OM}$ representa el factor de emisiones de CO_2 y E_{ac} es la energía fotovoltaica producida anualmente, con lo que se obtiene un ahorro de toneladas de CO_2 de aproximadamente 7,4 ($\text{tCO}_2/\text{Año}$).

B-I. Contaminación por el uso del generador térmico diésel de respaldo.

Estimando que el generador diésel trabaja un promedio de 5 horas mensuales por lo que en el año se estima un funcionamiento de 60 horas que trabajando a plena carga entrega una energía térmica ($E_{térmica}$) total de:

$$E_{térmica} = 12\text{Kw} * 60\text{h} = 720\text{Kwh}$$

con lo que multiplicándole por el factor de emisiones de CO_2 , el generador térmico contamina a la atmosfera un total de 0,47 $\text{tCO}_2/\text{Año}$ que es despreciable en comparación a lo que se tiene de ahorro de contaminación por el funcionamiento del generador fotovoltaico.

V. CONCLUSIONES

- Con el estudio de radiación solar, se establece que la irradiancia promedio para la ciudad Francisco de Orellana es de 4,4 $\text{KW}/(\text{m}^2.\text{día})$, valores aceptables para la implementación del proyecto.
- Con el funcionamiento del sistema solar fotovoltaico se tendrá una generación promedio anual de aproximadamente 1200 KWh entregados a la red que representarán un ahorro aproximado de \$1300 por año.
- Con la instalación del sistema fotovoltaico de energía renovable repercute en la disminución de las emisiones de CO_2 en 7,4($\text{tCO}_2/\text{Año}$) y por tanto la reducción de la contaminación atmosférica, del efecto invernadero y del cambio climático que de él se deriva.
- La automatización del arranque del generador térmico diésel permite que la microred preste mayores beneficios debido a que se garantiza disponibilidad de energía eléctrica las 24 horas del día.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar mantenimiento preventivo tanto al generador diésel como al sistema solar fotovoltaico tal y como se indica en el manual del usuario.
- Se recomienda a futuro realizar la adquisición de un grupo electrógeno de mayor capacidad que abastezca a todo el campamento y no solo al departamento administrativo de la empresa.
- Se recomienda revisar periódicamente el nivel de combustible del generador térmico para mantener un nivel aceptable siempre que entre a funcionamiento.
- Es recomendable que las empresas distribuidoras creen una normativa en nuestro país para el diseño, construcción y funcionamiento de sistemas de energía renovable ya que esto aplacaría en parte la falta de información bibliográfica que se tiene respecto a las Micro-redes.

- [1] A. Sánchez, Operación y control de Microredes, 2007.
- [2] R. Lasseter y P. Piagi, Extended Microred Using (DER) Distributed Energy Resources. Power Engineering Society General Meeting, IEEE2428 June 2007.
- [3] J. R. Leo, «Principios de la energía fotovoltaica.» 2010. [En línea]. Available: http://www2.uca.es/grup-invest/instrument_electro/Ramiro/docencia_archivos/TecnologiaCelulasModulos.PDF.
- [4] O. Perpiñán, «Energía Solar Fotovoltaica,» *Creative Commons*, 2012.
- [5] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, Hoboken: NJ: Wiley., 2013.
- [6] ENDENSA S.A. Los generadores eléctricos 2012,» [En línea]. Available: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/v.-funcionamiento-basico-de-generadores.
- [7] CENACE, «Factor de emisión de CO_2 del sistema nacional interconectado del Ecuador,» Quito, 2011.



Xavier Alvarez nació en Ambato – Ecuador, el 06 de Noviembre de 1988; Ingeniero Electromecánico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga en el 2014; actualmente presta sus servicios profesionales en la empresa Trace Oilfield Services (Coca-Ecuador) como Técnico Eléctrico categoría A desde el año 2013.



Israel Vaca nació en Latacunga – Ecuador, el 26 de mayo de 1989; Ingeniero Electromecánico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga en el 2014; actualmente presta sus servicios en la empresa Trace Oilfield Services (Coca-Ecuador) como Técnico Eléctrico categoría A desde el año 2013.