

# Micro-Red Eléctrica Inteligente Aislada aplicada a un Sistema de Alumbrado Público

Wilmer Suárez, Franklin Ocampo, Nataly Pozo, Marcelo Pozo  
Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador  
Quito, Ecuador

**Resumen** - Este documento presenta la operación y control de los convertidores estáticos de energía de una micro-red eléctrica inteligente aplicado a un sistema de alumbrado público a partir de fuentes de energía renovables solar fotovoltaica y eólica. El estudio fue realizado en la estación meteorológica "La Tola" ubicada en la parroquia rural de Pifo, Quito -Ecuador. A través del algoritmo de conductancia incremental y perturbador - observador aplicado en los convertidores reductores-elevadores se obtiene el Máximo Punto de Potencia (MPP), tanto para la energía proveniente de la irradiación solar, como para la generación eólica. La micro-red incluye un sistema de almacenamiento de energía que por medio de un convertidor DC/DC bidireccional controla la carga y descarga de las mismas, mientras que la carga (lámpara led) es alimentada mediante un convertidor DC/DC reductor. Los resultados obtenidos indican el buen funcionamiento del sistema tanto en estado estable como en estado transitorio.

**Índices** -Micro red eléctrica, Alumbrado público autónomo, MPPT, Perturbador y Observador, Conductancia Incremental.

## I. INTRODUCCIÓN

Debido al incremento de usuarios de aplicaciones industriales y domésticas tanto en áreas urbanas como rurales, la demanda energética en los últimos años en el Ecuador se ha incrementado [1]. Según el CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador), existe parte del territorio ecuatoriano sin electrificar, particularmente en las islas Galápagos, sectores de la Costa y de la Amazonía, en donde por razones de carácter técnico, económico, de impacto ambiental e incluso cultural imposibilitan que a estos sectores se les provea del servicio eléctrico convencional. Bajo este panorama las energías renovables no convencionales constituyen una alternativa para los propósitos de suplir esta necesidad energética[2].

Actualmente no existe en nuestro país un estudio de sistemas de tecnología inteligente para la iluminación exterior que aproveche la energía solar fotovoltaica y eólica, y con un rendimiento aceptable de manera autónoma, es decir para sistemas aislados o sin conexión al Sistema Nacional Interconectado (SNI). Dado que el consumo en sistemas de iluminación pública va en aumento, la contribución de sistemas energéticamente autosustentables aporta en el cambio de la matriz energética ecuatoriana y contribuyen al incremento del uso de energías limpias, las cuales a su vez permiten disminuir la contaminación de medio ambiente.

El presente trabajo investigativo se enfoca en la utilización de dos fuentes de energía renovable disponibles en el país, las cuales a través de un sistema de almacenamiento y gestión de la demanda energética cubren los requerimientos de una carga puntual, un poste de alumbrado público.

El sistema se compone de generación eólica y solar fotovoltaica que junto con los convertidores DC/DC

reductores-elevadores operan bajo la técnica de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT).

Por otra parte, un convertidor DC/DC bidireccional controla el sistema de baterías para el almacenamiento de energía y un convertidor reductor controla la cantidad de energía que alimenta la lámpara led.

Se ha considerado como escenario para la micro-red eléctrica, los datos de irradiación solar y perfiles de viento medidos en la parroquia rural de Pifo de la ciudad de Quito, a partir de los cuales se plantean varios escenarios para determinar la contribución de cada tipo de generación y el manejo eficiente de la energía de todo el sistema.

## II. ESTRUCTURA DE LA MICRO-RED ELÉCTRICA

En la Fig. 1 se observa el diagrama de bloques de la configuración del sistema. Al bus DC se inyecta la energía entregada tanto por el panel solar fotovoltaico como por el generador eólico a través de convertidores DC/DC tipo reductor-elevador[3]. Mientras que el sistema de baterías controla la carga y descarga de las mismas mediante un convertidor bidireccional. Por otra parte, se suministra energía a la lámpara led utilizando un convertidor DC/DC reductor.

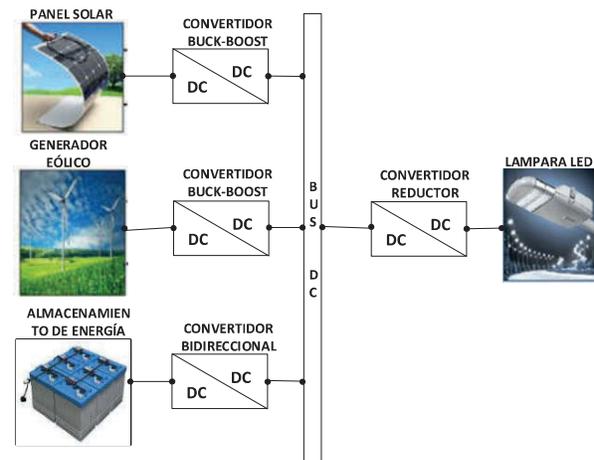


Fig. 1. Diagrama de bloques general del sistema

### A. Generación Fotovoltaica

La medición de la radiación solar en Ecuador utiliza el criterio de brillo solar. La conversión de la heliofanía a valores de radiación convencionales se realiza a partir de modelos empíricos y teóricos que incorporan dentro de sus coeficientes los registros de nubosidad, de temperatura, de ubicación geográfica, entre otras variables[4].

De acuerdo con los datos de radiación solar, se obtiene el comportamiento horario diario de la energía solar en la zona

rural de Quito de la estación meteorológica M0002 “La Tola” (10 de agosto 2015), el cual es presentado en la Fig. 1.

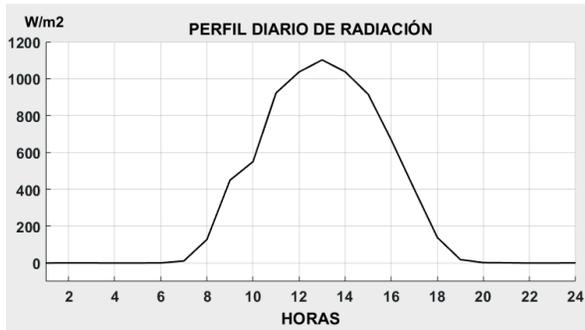


Fig. 2. Perfil de radiación solar de un día para la ciudad de Quito[5]

El recurso solar que recibe la ciudad de Quito supera los 4.000 Wh/m<sup>2</sup>/día[6]. Para el sistema propuesto se ha escogido el panel fotovoltaico modelo BYD 235P6A-30[7], cuya P<sub>max</sub>=235W @ 1000 W/m<sup>2</sup> y 25°C; V<sub>max</sub>=29.24 V; Voc= 37 V; Isc= 8.48 A.

### B. Generación Eólica

En la zona urbana de la ciudad de Quito se alcanza una velocidad promedio de viento de aproximadamente 2 a 3 m/s, mientras que en las zonas rurales se llega a tener velocidades promedio de 7 a 8 m/s[8].

Por tal razón se ha seleccionado un generador eólico trifásico de eje horizontal y 5 palas de imanes permanentes de P<sub>nom</sub>= 400 W @ 1200 RPM, V<sub>max</sub>=50V. La potencia entregada por este generador eólico tomando como velocidad promedio del viento 8 m/s es[9]:

$$P_t = C_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot v^3 = 140 \text{ W} \quad (1)$$

Donde,  $C_p$  es el coeficiente de potencia igual a 0,53,  $\rho$  es la densidad del aire en Quito de 0,892 Kg/m<sup>3</sup>,  $D$  es el diámetro de las hélices igual a 1,21 m.

### C. Sistema de alumbrado público – lámpara led

Para la iluminación de vías se tienen lámparas de elevados rendimientos luminosos con un bajo consumo y vida útil larga[10]. Para esta aplicación se ha escogido una lámpara tipo led de 80W, 12 – 24Vdc, y un flujo luminoso de 7400– 9200lm.

### D. Sistema de almacenamiento de energía

De acuerdo con la demanda de energía del sistema, la lámpara led debe estar encendida 13 horas diarias, considerando las horas de oscuridad durante un día completo.

La profundidad de descarga diaria permitida al banco de baterías va del 20 al 80%[11] y para el caso de baterías de gel 70%.

Utilizando un factor de seguridad del 20% y para tres días de autonomía, la capacidad del banco de baterías está dado por la siguiente ecuación:

$$C_{bat} = \frac{\left( \text{Total de } \frac{\text{Ah}}{\text{día}} \right) * N}{\text{Dod}} = 222.5 \frac{\text{Ah}}{\text{día}} \quad (2)$$

Por tanto, para el sistema se ha seleccionado un banco de baterías de gel de 220 Ah/día, 24Vdc y 20 A.

### E. Convertidor DC/DC reductor – elevador

Para esta aplicación se implementó los convertidores DC/DC reductores –elevadores, tanto para la conexión de la energía solar como eólica, estos trabajan en un bus común de 24 Vdc fijado por las baterías, además trabajan en modo de conducción continua a una frecuencia de conmutación de 5 KHz, voltaje de salida de 29 Vdc y con un rizado menor al 1%. Donde L= 43 mH y C= 2.2 mF.

### F. Convertidor DC/DC bidireccional

Con el fin de controlar la carga y descarga de las baterías, se ha empleado un convertidor bidireccional como se muestra en la Fig. 3. La carga se realiza cuando existe suficiente energía generada en el bus DC y la descarga cuando alimenta a la lámpara led, es decir cuando no están aportando las fuentes de energía renovable. Para la topología propuesta se tiene L= 25 mH y C= 1mF.

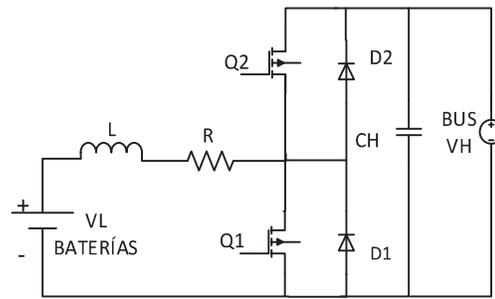


Fig. 3. Topología convertidor DC/DC bidireccional tipo C[12]

### G. Convertidor DC/DC reductor

Permite controlar el paso de energía proveniente del bus DC hacia la carga, se utiliza debido al excedente de energía que existe cuando aportan las dos fuentes alternativas. Este convertidor trabaja en conducción continua a una frecuencia de conmutación de 5 KHz, obteniendo un voltaje de salida de 24 Vdc y una corriente de 3.3 A.

## III. ALGORITMOS DE CONTROL DEL SISTEMA

Para lograr una gestión de energía eficiente en el sistema, se han aplicado técnicas para alcanzar el punto máximo de potencia (MPP) de cada una de las fuentes de energías limpias utilizadas, las cuales recurren a reguladores proporcionales e integrales (PI) para alcanzar su punto exacto de trabajo.

Adicionalmente, se ha incluido el control del convertidor bidireccional para la adecuada carga y descarga del sistema de baterías y el control del convertidor tipo reductor para suministrar la energía requerida por la lámpara durante las horas de funcionamiento.

En la Fig. 4 se detalla el esquema de conexión de la generación fotovoltaica y eólica.

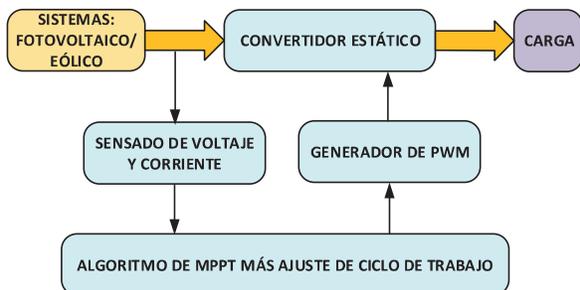


Fig. 4. Diagrama de bloques de la obtención del MPPT.

A. MPPT - Conductancia Incremental para el panel solar

El punto de operación de un panel fotovoltaico cambia con la irradiación solar y la temperatura de la celda solar, como se muestra la Fig. 5. Por esta razón es indispensable alcanzar dicho punto de trabajo para extraer la mayor potencia posible durante su funcionamiento.

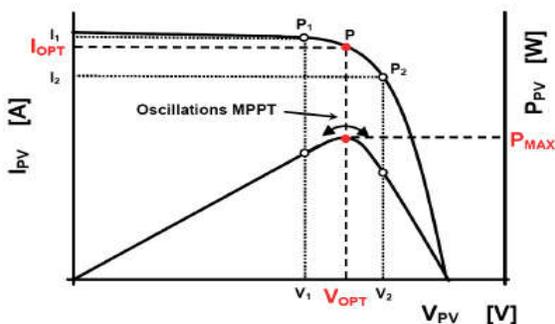


Fig. 5. Curva Potencia/ Corriente vs. Voltaje para una celda fotovoltaica[13]

Se utilizó el método de conductancia incremental, cuyo criterio de implementación digital es simple, efectivo, y utiliza el menor número de sensores posibles y tiene el menor costo. Para obtener la máxima potencia en función de los diferentes parámetros climatológicos (radiación solar y temperatura) se debe analizar la posición del punto de operación con respecto al máximo punto de potencia, como se indica en la ecuación (3):

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V.I)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (3)$$

De donde se obtienen las siguientes condiciones:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ en el MPP} \quad (4)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ en el lado izquierdo de MPP} \quad (5)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ en el lado derecho del MPP} \quad (6)$$

Para obtener la máxima potencia del sistema, se monitorean el voltaje y corriente. Con estos valores se modifica la dirección del punto de operación y se alcanza el máximo punto de la curva Potencia vs. Voltaje.

Esto se indica en el diagrama de flujo de la Fig. 6. En base al algoritmo de MPPT indicado, se consigue la relación de trabajo del convertidor reductor – elevador para obtener el MPP. La Fig. 7 muestra su esquema de conexión.

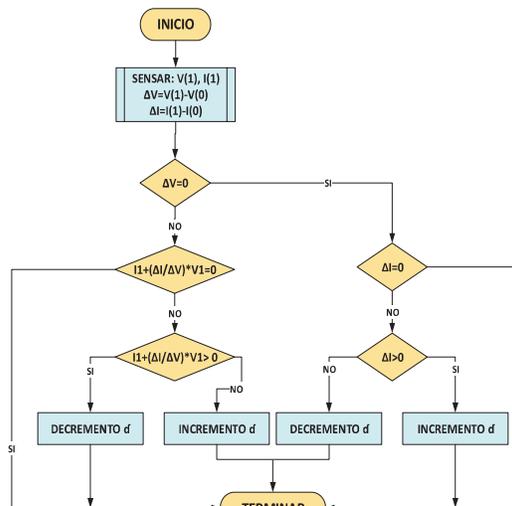


Fig. 6. Algoritmo MPPT – Conductancia Incremental [13]

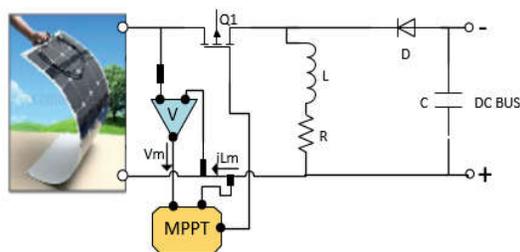


Fig. 7. Esquema de conexión panel fotovoltaico – convertidor DC/DC reductor elevador

B. MPPT – Perturbador y Observador (P&O) para la generación eólica

Para obtener el punto máximo de potencia de la energía eólica, se utilizó la técnica de lazo cerrado P&O debido a que su implementación digital es simple y su desempeño es aceptable para bajas variaciones de velocidad. Las condiciones de operación de este método son: pendiente positiva, punto óptimo y pendiente negativa de acuerdo con la Fig. 8.

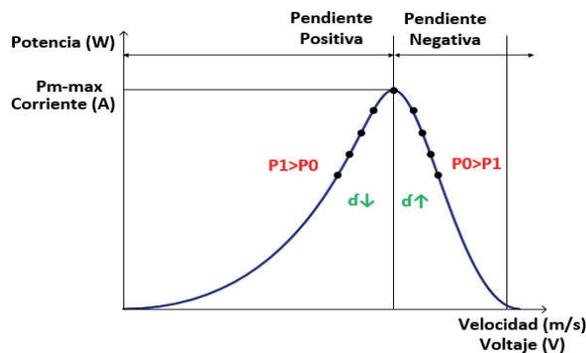


Fig. 8. Curva Potencia vs. Velocidad/Voltaje generador eólico[14]- [15].

Para lograr el MPPT se implementó el algoritmo detallado según el diagrama de flujo de la Fig. 9. Es decir, obtener el máximo punto de la curva Potencia Vs. Velocidad.

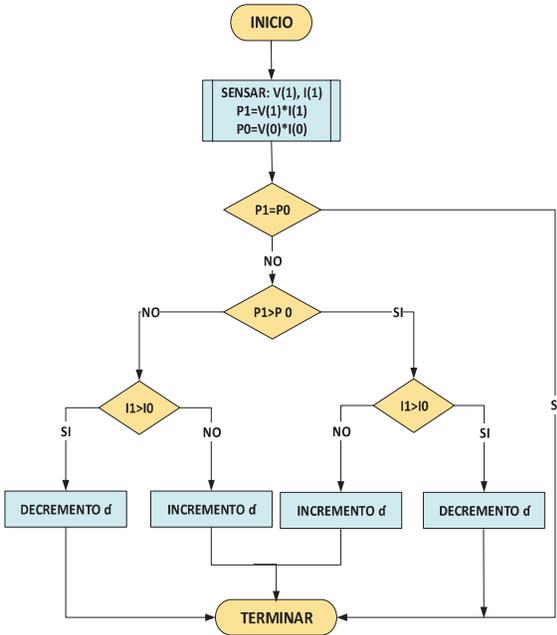


Fig. 9. Algoritmo MPPT – Perturbador Observador [13].

C. Control en cascada del convertor bidireccional

La intermitencia en la generación de energía no convencional, debido a los cambios en las condiciones climáticas, hacen que el control del sistema de almacenamiento sea un aspecto crucial para garantizar el suministro de energía a la carga sin importar las variaciones ya sea de irradiación solar o viento.

Para la topología propuesta para el convertidor bidireccional, se tiene lo siguiente: cuando la corriente fluye desde las baterías hacia bus DC, el circuito equivalente representa un convertidor elevador, en este modo las baterías empiezan a descargarse entregando la corriente a la carga del sistema. Por otro lado, cuando la corriente va en dirección hacia las baterías, el circuito equivalente es un convertidor reductor, en este modo las baterías se cargan a partir de la generación de energía solar y eólica.

El control de corriente unificado propuesto para el convertidor bidireccional tiene un controlador en cascada que es rápido y robusto el cual consiste en un lazo interno que regula corriente en el inductor y el lazo externo que regula voltaje en el capacitor, el lazo interno es por lo menos diez veces más rápido que el externo, consiste en colocar un bucle interno de corriente dentro de un bucle de voltaje superpuesto como se observa en la Fig. 10. Se han utilizado controladores PI y se han calculado sus parámetros de control  $K_i$  y  $K_p$  utilizando el criterio control en cascada por medio de variables de estado.

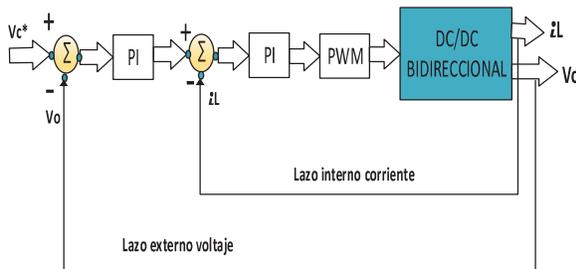


Fig. 10. Control en cascada del convertidor DC/DC bidireccional [16]

Donde,  $V_c^*$  es voltaje de referencia 24 V,  $V_o$  es el voltaje medido a salida del convertor bidireccional,  $i_L$  es la corriente medida en inductor del convertor bidireccional. El control supervisor del sistema de almacenamiento de energía se presenta en la Fig. 11.

Para garantizar una mayor vida útil de las baterías se debe evitar estados de carga y descarga profunda de las mismas. Cuando el estado de carga (SoC) de las baterías, se encuentran sobre el 85% desconecta las fuentes generadoras eólica y solar, es decir ya no se permite que se sigan cargando las baterías y cuando el SoC es menor al 30% se llega a un estado crítico y se desconecta la alimentación a la carga [17].

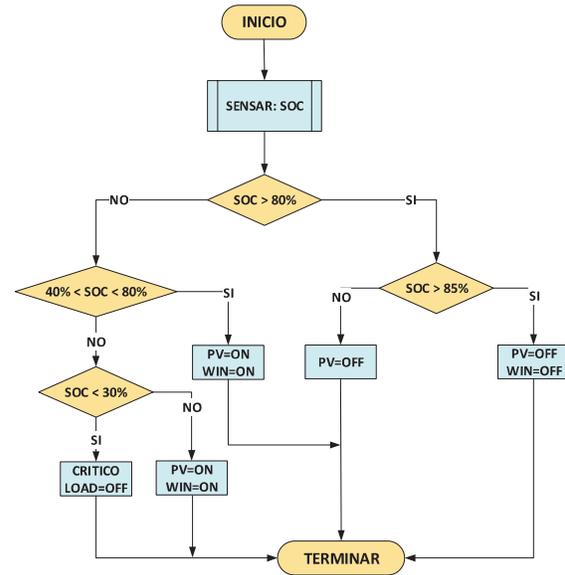


Fig. 11. Control supervisor de carga y descarga de las baterías.

D. Control de suministro de energía de la lámpara led

La carga del sistema (lámpara led) está conectada al bus DC mediante un convertidor DC/DC reductor y una fotocélula que permite su conexión cuando detecta la ausencia de luz natural. El convertidor reductor mantiene constante el voltaje y la corriente de alimentación necesaria para el funcionamiento de la lámpara led por medio de un regulador proporcional – integral.

IV. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Para analizar el comportamiento general del sistema se tienen tres escenarios (Tabla I) basados en la Fig.12, que muestra los perfiles de irradiación solar, temperatura y de viento en el año 2015 para la ciudad de Quito.

Tabla I. ESCENARIOS DE PRUEBA DEL SISTEMA

	Periodo	Meses	Descripción
Escenario 1	24 horas	Julio	Mes de mayor radiación al año
Escenario 2	31 días	Agosto	Verano
Escenario 3	12 meses	Año 2015	Periodo anual

Para el Escenario 1, en la Fig. 12, se tiene el comportamiento del sistema para un día completo en el mes de mayor producción solar en el año (Julio).

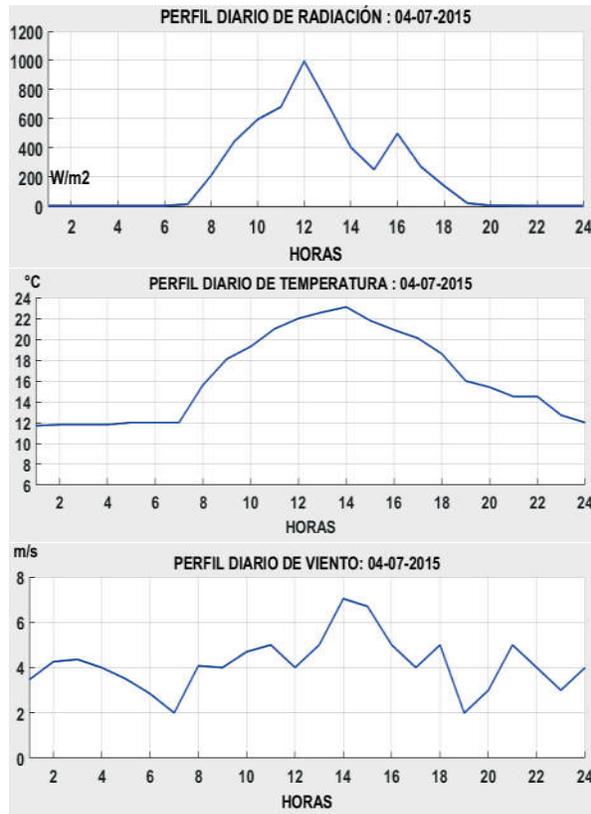


Fig. 12. Condiciones climáticas 24H Julio 2015.

A partir de la Fig. 13, se puede visualizar que la corriente máxima entregada por el sistema fotovoltaico es de 8.2 [A] y del eólico 6.1 [A]. El sistema de baterías absorbe energía entre las 07:00 y 18:30 horas, período en el cual no se está alimentando la lámpara led. Mientras que el resto del tiempo, es decir en horas de la noche el sistema entrega a la carga un voltaje constante de 24 Vdc y 3.3 A

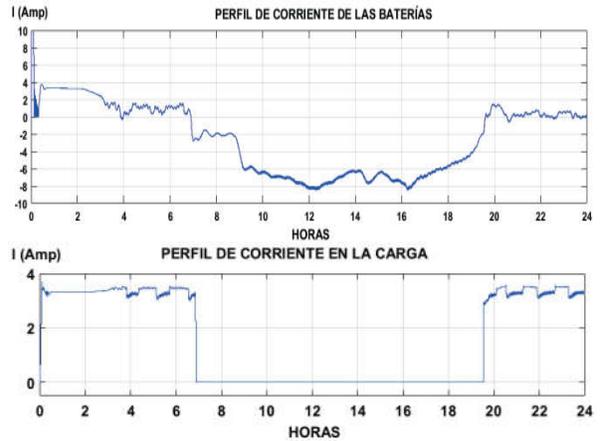
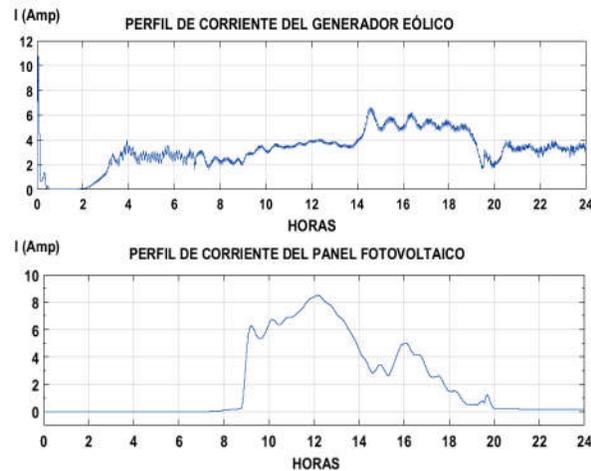


Fig. 13. Aporte de Energía Sistema 24H.

Para el Escenario 2, se ha seleccionado el mes de agosto debido a que en los meses de Julio a septiembre existe mayor potencial de radiación.

Como se muestra en la Fig. 14, con las técnicas de MPPT implementadas durante el periodo de 31 días, se tiene en el sistema fotovoltaico una potencia promedio de 195 W y en el sistema eólico un promedio de potencia de 168 W, con esta energía se puede garantizar la alimentación a la carga y baterías.

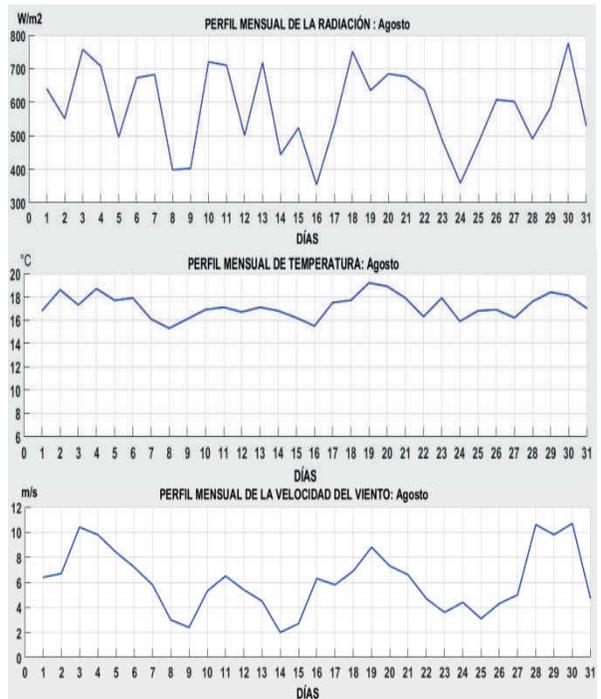


Fig. 14. Condiciones climáticas 31 Días (Mayor Potencial)

Como se puede ver en la Fig. 15, que el sistema gestiona adecuadamente la energía para alimentar la carga.

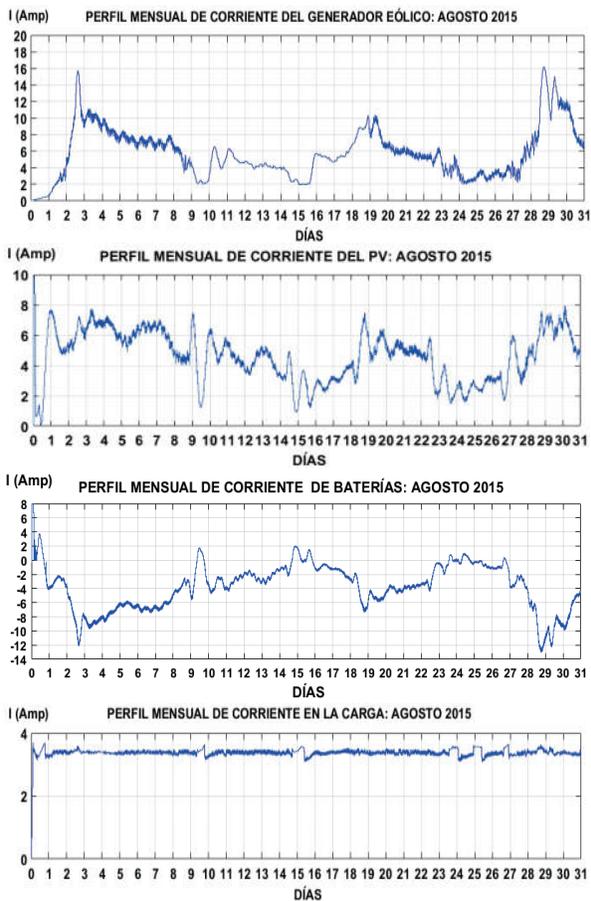


Fig. 15. Aporte de Energía Sistema 31 Días (Mayor Potencial).

Para el Escenario 3, se ha escogido el periodo anual (año 2015). Este análisis ayuda a tomar una mejor decisión para analizar las características que debe cumplir el sistema (eólico, solar o híbrido), como se puede observar en la Fig. 16. De manera similar al escenario 2, se trabaja con el promedio diario de potencia teniendo así un promedio de la potencia de generación fotovoltaica de 155 W y de generación eólico 150 W. Por lo tanto, como se puede ver en la Fig. 17, el aporte de la energía renovable satisface la demanda de energía a la carga de una forma confiable y eficiente.

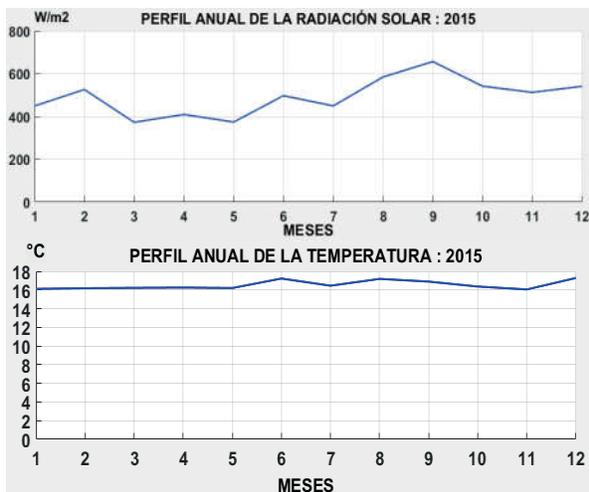


Fig. 16. Condiciones climáticas anual año 2015

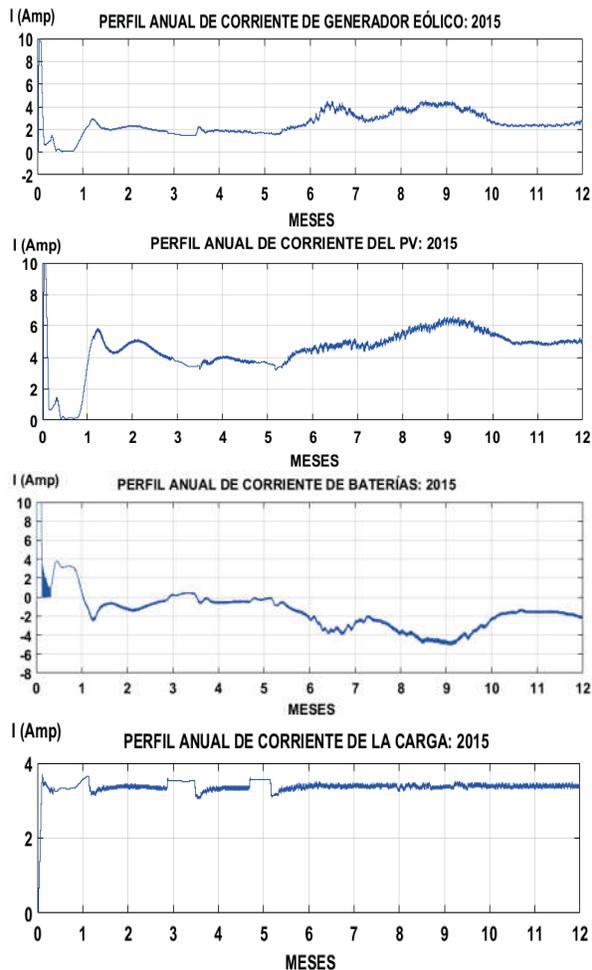


Fig. 17. Aporte de Energía anual año 2015

### V. CONCLUSION

Se demostró el correcto funcionamiento de los convertidores estáticos diseñados e implementados, así como las técnicas aplicadas en el sistema para obtener el punto máximo de potencia en los diferentes escenarios de generación y consumo planteados.

Se comprobó la factibilidad técnica para producir energía suficiente que alimenta una carga puntual a través de sistemas híbridos a escala pequeña, mediante el manejo de la energía junto con un sistema de almacenamiento. El control realizado en los diferentes convertidores estáticos utilizados en el sistema (generación eólica - solar y almacenamiento de energía) permitió alcanzar la máxima eficiencia posible que es del 94.3% para la generación fotovoltaica y 88.3% para la eólica.

## VI. REFERENCIAS

- [1] OLADE, "Organización Latinoamericana de Energía," Quito, 2013.
- [2] CONELEC, "Estadísticas del Sector Eléctrico Ecuatoriano," Quito, 2009.
- [3] M. H. Rashid, *Electronica de Potencia*, México: Centeno No. 162.1, 1995.
- [4] I. Moradi, "Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. *energy* 32 Isevier," 2008.
- [5] INAMHI, *Datos meteorológicos del Distrito Metropolitano de Quito*, Quito, 2015.
- [6] CONELEC, "Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica," Quito, 2008.
- [7] BYD, "zonnepanelen," 24 Mayo 2011. [Online]. Available: [https://www.zonnepanelen.net/nl/pdf/panels/BYD\\_220-250P.pdf](https://www.zonnepanelen.net/nl/pdf/panels/BYD_220-250P.pdf).
- [8] L. A. Sola, "Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo savonius para electrificación rural," 2012.
- [9] MEER, "Atlas Eólico del Ecuador," Quito, 2013.
- [10] L. B. Blazquez, "Iluminación de Vías".
- [11] S. J. Sanchez Miño, *energías Renovables Conceptos y aplicaciones.*, Quito, 2003.
- [12] H. Lee Palacios, R. Mendoza Macías and J. Ruiz Molina, "Diseño de un convertidor DC/DCcon conmutación forzada por voltaje y modulación," , Guayaquil, 2004.
- [13] M. A. Abdullah, A. Yatim and C. W. Tan, "Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy System," 2011.
- [14] J. A. Frutos Martínez, C. G. Sergio, C. C. Oscar and O. G. Rubén, "Estudio Comparativo de algoritmos de búsqueda del MPPT en sistemas de Generación Eólica," Colima, México, 2012.
- [15] C. Kamalakannan, L. Padma Suresh and S. P. B. K. Sekkar Dash, *Power Electronics and Renewable Energy Systems*, 2014.
- [16] L. Wang and K. C. Ng., "Sensitivity analysis of PI cascada control of power converter," Japon, 2013.
- [17] YUBA, "Etapas de carga de una batería," 2015. [Online]. Available: [http://www.yubasolar.net/2014\\_12\\_01\\_archive.html](http://www.yubasolar.net/2014_12_01_archive.html).

## VII. REFERENCIAS



**Franklin Ocampo Jiménez**, nació en Pedro Vicente Maldonado, provincia pichincha, Quito-Ecuador el 9 de septiembre de 1978. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Técnico Superior "SUCRE". Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Tecnólogo Electromecánico en 2008 e Ingeniero en Electrónica y Control en 2011. Trabajó en Repsol S. A hasta el 2017, en los campos petroleros, Bloque 15, Petroamazonas y bloque 16, Repsol.

Actualmente se encuentra culminando la tesis de Magister en Eficiencia Energica en la institución Politécnica Nacional del Ecuador. Áreas de interés: Automatización, electrónica y control, maquinas eléctricas.



**Wilmer Suárez**, nació en Quito-Ecuador el 3 de mayo de 1983. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio San Pedro Pascual. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 2011. Su experiencia laboral fue en octubre del 2010 como Técnico Eléctrico en Smartpro B15, 2014 como Supervisor Eléctrico en Petroamazonas E.P. Actualmente desempeña el cargo de

Coordinador de Ingeniería y Proyectos en Secorsa.

Áreas de interés: eléctrica, energías alternativas, automatización y control industrial



**Nataly Aracely Pozo Viera**, nació en Pillaro- Ecuador, el 10 de febrero de 1991. Estudió en el Colegio "Santo Domingo de Guzmán" – Ambato. En el año 2014 se graduó como Ingeniera en Electrónica y Control en la EPN. A partir de entonces trabajó como Técnico Docente Politécnico. En los años 2015-2016 estudió en la Universidad de Newcastle – Reino Unido, en donde obtuvo el título de MSc. Electrical Power. Actualmente se desempeña en el cargo de Profesora a Tiempo Completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial de la EPN.

Sus áreas de interés son: Electrónica de Potencia, Conversores Estáticos, Energía Renovable, Redes Eléctricas Inteligentes, Diseño y Control de Máquinas.



**Marcelo Pozo**, nació en Quito-Ecuador. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. Gracias a una beca del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) estudió su Masterado en la Universidad Técnica de Dresden-Alemania obteniendo el título de M.Sc.E.E. en septiembre del 2002. Entre el 2003 y 2009 se dedicó al trabajo en la industria. A partir de septiembre del 2009 se desempeña en el cargo de

Profesor Principal a tiempo completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial (DACI) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional-Quito, Ecuador. Entre finales del 2010 y principios del 2015 realizó su proyecto de Doctorado en Ingeniería en la Universidad de Siegen, Alemania, especializándose en Electrónica de Potencia y Control Electrónico de Máquinas Eléctricas.