

# Simulación y Análisis del Sistema Híbrido Isla Floreana en Galápagos

A. Moreno

P. Carvajal

Ministerio de Electricidad y Energía Renovable -MEER

**Resumen** — La autonomía y confiabilidad que los sistemas de energía renovable pueden brindar a regiones aisladas se ve limitada debido a la intermitencia y disponibilidad del recurso, razón por la cual se hace preponderante el aprovechamiento conjunto de distintas fuentes que permitan garantizar el abastecimiento de energía. Este trabajo presenta el dimensionamiento y diseño del nuevo sistema híbrido a instalarse en isla Floreana-Archipiélago de Galápagos en el año 2013. Se dimensionará y analizará el comportamiento del sistema híbrido considerando la operación de cada uno de sus componentes en tres modalidades distintas de operación: 1. Línea base solo con generación térmica; 2. Sistema híbrido PV-Aceite de Piñón<sup>1</sup> en operación *Diesel-off* (para los generadores); y 3. Sistema híbrido PV-Aceite de Piñón en operación *Peak Shaving*. Se pretende evaluar cual esquema de operación supone el mayor beneficio técnico y económico, la mayor penetración de energía solar y por ende un menor consumo de combustible fósil y de aceite de piñón. Actualmente el sistema de Floreana cuenta con una planta fotovoltaica de una potencia instalada de 20,6 kWp y un sistema térmico de 138 kW (dos generadores de 69kW). La simulación del sistema se realizará en el software para optimización de sistemas híbridos de energía HOMER v.2.86.

**Palabras clave** — Energía solar fotovoltaica, mini redes, diesel-off, peak shaving, sistemas híbridos, Galápagos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Con una extensión de alrededor de 173 km<sup>2</sup>, la isla Floreana es una de las islas más pequeñas del Archipiélago de Galápagos y la menos poblada; actualmente su población es cercana a los 200 habitantes. Debido principalmente a las actividades turísticas que se desarrollan en las islas Galápagos, los últimos años la demanda eléctrica en cada una de

las islas habitadas (Santa Cruz, San Cristóbal, Isabela y Floreana), ha tenido un crecimiento acelerado a tasas de alrededor del 10% anual. En el caso particular de isla Floreana, de acuerdo con las tasas de crecimiento de la demanda, se espera que en el año 2018 la demanda pico de la isla esté en el orden de 60 kW. Actualmente la demanda pico bordea los 45kW [1].

En el caso específico del proyecto Sistema Híbrido Floreana, se cuenta con dos generadores térmicos y una planta fotovoltaica pero que actualmente no están funcionando de manera conjunta ni optimizada. La hibridación del sistema se realizará con la introducción de inversores formadores de red que estarán a cargo de administrar la red, controlar la generación/despacho de energía de acuerdo a la demanda y el recurso disponible. Las especificaciones generales del sistema híbrido que se prevé tener se pueden identificar en la Tabla 1. [2]

Tabla 1: Especificaciones generales del Sistema Híbrido Floreana

Planta	Potencia DC: 21kWp Regulación de potencia activa mediante frecuencia
Planta térmica	Uso de aceite puro de Jatropha 138kW en 2 grupos 2 Grupos de 69kW Factor de potencia 0,8
Almacenamiento de Energía	<b>Diesel-off</b> Tipo: plomo ácido Capacidad: 188 kWh @C10
	<b>Peak shaving</b> Tipo: plomo ácido Capacidad: 292 kWh @C10

Con estos antecedentes, la arquitectura del sistema híbrido térmico-fotovoltaico está concebida para maximizar la reducción del consumo de combustible, mediante el mayor aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, considerando para ello la operación del sistema sin la participación de los grupos generadores duales (aceite de piñón-diesel) durante las horas del día cuando existe mayor radiación solar en la Figura 1 [3].

<sup>1</sup> Las semillas de Piñón (lat. *jatropha curcas*) contienen un aceite no comestible, que se puede utilizar directamente para aprovisionar motores de combustión. En Ecuador el árbol de Piñón es utilizado como cerca viva en varios lugares del litoral.

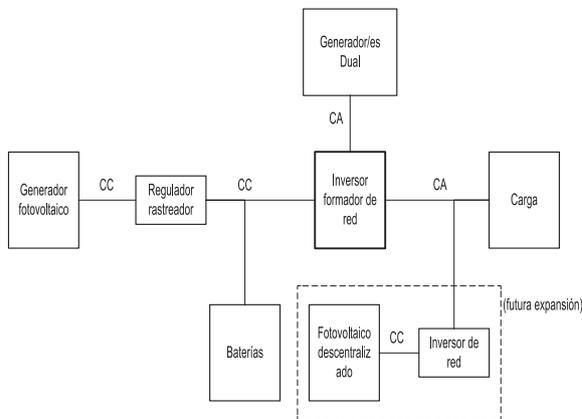


Figura 1: Arquitectura del Sistema Híbrido acoplado en AC

El sistema de almacenamiento, será el encargado de almacenar el exceso de energía que la planta fotovoltaica produzca durante el día, para suministrarla en horas de la noche. La energía almacenada será la necesaria para evitar el arranque del segundo grupo térmico durante la hora punta (demanda pico). Sin embargo, dependiendo de la modalidad de operación, el tamaño del banco de baterías varía. A continuación una breve explicación de los tres escenarios de operación que serán simulados y analizados en este trabajo:

- a) **Generación térmica 100%:** esta modalidad constituye la opción en el caso de no haber participación de energía solar alguna. Representa la línea base y el consumo real de combustible (diesel o aceite de piñón) que debería tener la isla, en el caso de que el sistema de generación opere únicamente con una planta térmica diesel. Cabe indicar que actualmente el sistema opera en base a este esquema.
- b) **Diesel-off:** con el fin de maximizar el ahorro de combustible se restringe la operación de los generadores térmicos durante el día, entre 8h00-16h00 considerando que los altos índices de radiación solar en la isla y la baja demanda durante ese periodo permitirá el abastecimiento continuo de energía eléctrica a través del sistema de generación fotovoltaico. Las baterías se requieren solo para cubrir faltas eventuales de energía durante periodos de baja radiación solar. Los generadores térmicos trabajan a la potencia demandada durante las horas de la noche, ver en la Figura 2 [4].
- c) **Peak shaving:** el objetivo de esta modalidad de operación, es almacenar en el banco de baterías parte del excedente de generación fotovoltaica del día para ser usado por la noche durante las horas pico. Se dimensiona el banco de baterías para reducir la operación de los generadores térmicos por la noche y de

esta manera se pueda evitar el arranque de un tercer generador durante el periodo pico, en la Figura 3 [5].

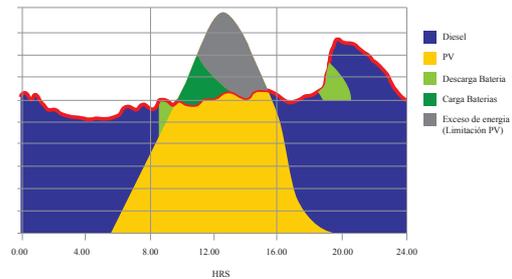


Figura 2: Diagrama modo de operación Diesel-off para un sistema híbrido FV-térmico

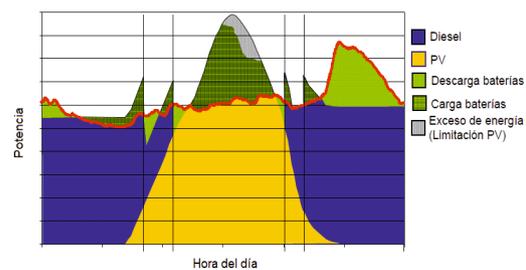


Figura 3: Diagrama modo de operación de Peak Shaving para un sistema híbrido FV-térmico

## 2. DEMANDA ELÉCTRICA DE ISLA FLOREANA

Actualmente en la isla Floreana, el 100% de la energía eléctrica de Puerto Velasco Ibarra, es producida a través de la operación de equipos térmicos duales. Al 2012, la isla Floreana tiene una demanda máxima de potencia pico de alrededor de 45 kW, misma que se presenta entre los meses de enero a mayo, en la Figura 4, y que está relacionada principalmente con el aumento de la temperatura, la cual es ocasionada por la temporada invernal (uso de ventiladores y A/C) [2].

Debido al cambio estacional invierno-verano, el perfil de variación estacional de la potencia pico varía desde -15% hasta +20% con respecto a la media de potencia pico anual. Los meses con mayor demanda son marzo, abril y mayo. En el caso de los meses de agosto a octubre, se presenta el periodo con menor demanda, en la Figura 4. Debido a la reducida presencia de industria y comercio, la curva de carga diaria es similar para todos los días de la semana, donde el intervalo pico de demanda es entre 18h00 a 22h00, siendo el máximo a las 19h00, ver en la Figura 5.

Con respecto a la tasa de crecimiento anual de la demanda de los últimos 5 años, la isla Floreana ha presentado algunos inconvenientes en cuanto al abastecimiento de energía eléctrica, por fallas

en el anterior sistema de generación así como por la falta de combustible para la operación de los mismos.

Con esta consideración los índices de crecimiento de la demanda registrados varían entre -5.68% (cuando hay falta de combustible) a 162% (cuando es liberada la demanda reprimida de la isla). En el caso del consumo de combustible para generación eléctrica, en el año 2011 se consumieron 17 621 galones de diesel y 2 964 galones de aceite de piñón, en la Figura 6 [1].



Figura 4: Demanda de potencia pico año 2011<sup>2</sup>

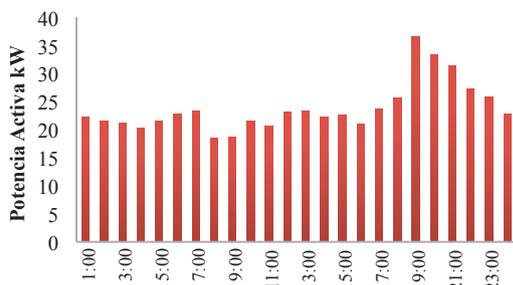


Figura 5: Curva de demanda Isla Floreana año 2012



Figura 6: Demanda de energía eléctrica y combustible año 2011

Como dato importante, en la Tabla 2, se puede observar las proyecciones de demanda para la isla de acuerdo a las tasas de crecimiento analizadas correspondiente a los escenarios máximo y promedio respectivamente.

Tabla 2: Proyección de la demanda

Año	promedio	max	min	registros
2004	29	31	30	29
2005	31	33	31	38
2006	32	35	32	23.2
2007	34	37	33	24
2008	36	40	34	29
2009	38	42	35	32
2010	40	45	36	32
2011	42	48	37	45
2012	45	51	38	
2013	47	54	39	
2014	50	58	40	
2015	52	62	41	
2016	55	66	43	
2017	58	70	44	
2018	61	75	45	
2019	65	79	47	
2020	68	85	48	
2021	72	90	49	

### 3. RECURSO SOLAR

En la Figura 7, se pueden observar los valores de insolación global y las horas de sol pico mensual de acuerdo a mediciones de recurso solar realizadas en la ciudad de Puerto Velasco Ibarra - Isla Floreana. Es importante señalar que los meses de mayor recurso solar enero-mayo, corresponden a los meses en donde se presenta la mayor demanda de energía eléctrica.

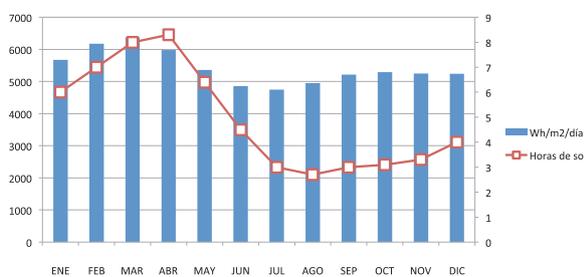


Figura 7: Insolación global y horas de sol pico

### 4. ACEITE DE PIÑÓN

Como consecuencia del alto costo de los combustibles fósiles y el impacto ambiental que estos ocasionan, en los últimos años alrededor del mundo se han realizado estudios con respecto a la utilización de nuevos tipos de combustibles ambientalmente amigables. En este sentido, el aceite piñón brinda una gran expectativa como un nuevo tipo de combustible. El piñón conocido por su nombre científico como *jatropha curcas*, presenta características físicas y

2 Datos Empresa Eléctrica Provincial Galápagos

químicas entre las que sobresalen su poder calórico inferior entre 36-39 MJ/kg (Diesel: 45,10 MJ/kg).

Con este antecedente y debido a los incidentes ambientales que se generan por el transporte de combustibles fósiles al Archipiélago de Galápagos, a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, en el año 2008 se esquematizó el proyecto “Piñón Galápagos”, mismo que en su primera etapa contempló el cultivo, producción y extracción de este aceite (Prov. de Manabí), para abastecer en un inicio la demanda del sistema de generación eléctrica de isla Floreana y en un futuro a la isla Isabela.

Adicionalmente al trabajo agrícola, dentro del proyecto se realizó la dualización<sup>3</sup> de los nuevos equipos térmicos que se instalaron en el año 2010 en Puerto Velasco Ibarra (Floreana), para que puedan operar tanto con aceite de piñón como con diesel. La operación de los generadores de la Isla Floreana con 100% aceite de *Jatropha* ha sido exitosa y sin mayores inconvenientes [6]. Desde el inicio de operación del sistema térmico dual (2011) hasta la fecha se han generado cerca de 100 000 kWh.

## 5. DATOS DE ENTRADA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA

El software HOMER v2.86, es utilizado ampliamente a nivel mundial para optimizar y simular el comportamiento de sistemas híbridos que pueden tener sistemas de generación, fotovoltaico, hidroeléctrico, de biomasa, eólico, térmico, etc.

Para la utilización de este software, se debe esquematizar el sistema híbrido considerando los sistemas de generación, sistemas de almacenamiento de energía y la demanda energética del sistema, en la Figura 8. Para este proyecto, los datos de entrada y condiciones introducidas han sido definidos a partir de datos recopilados por ELEGALÁPAGOS y otros estudios realizados en el Archipiélago [6].

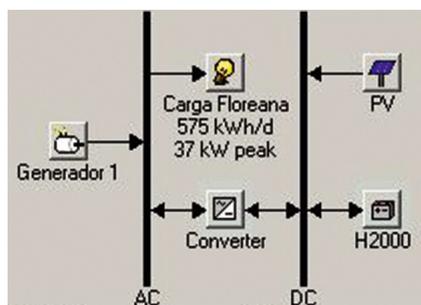


Figura 8: Esquema para simulación del sistema híbrido Floreana

<sup>3</sup> Adaptación para que los generadores térmicos puedan trabajar con dos tipos de combustible. En este caso los generadores pueden operar con 100% Diesel, 100% Aceite o una mezcla de ellos.

En la Tabla 3, se muestran los parámetros y condiciones de operación de los tres esquemas del sistema híbrido Floreana.

Para la simulación de los distintos esquemas de operación del sistema híbrido Floreana, se realizó implementando el modo de simulación *time-steps*, el cual permite definir distintos intervalos de simulación. Para este proyecto se definió un intervalo de una hora por un periodo de un año para cada uno de los tres escenarios de operación planteados.

Tabla 3: Datos de entrada para la simulación

Parámetro	Valor/ Característica
<b>Baterías</b>	
Capacidad nominal con 100% térmico	0 kWh
Capacidad nominal con Diesel-off	192kWh
Capacidad nominal con Peak shaving	288kWh
Voltaje Nominal Banco	48V
Estado mínimo de carga	40%
Baterías en serie	24 (48V Bus)
Autonomía	Mínimo 6horas
<b>Paneles solares</b>	
Potencia nominal DC	20,6 kWp
Vida útil:	20 años
Inclinación:	5°
Azimut (W de S)	-4°
Reflejo del piso	20%
Coefficiente de temperatura	-0.4%/C
NOCT	49°C
Eficiencia STC	13%
<b>Controlador/Inversor</b>	
Potencia	60kW
Vida útil	10 años
Eficiencia	95%
<b>Generadores térmicos</b>	
	Duales: Piñón/Diesel
2 Grupos de Carga mínima	69kW 50% <sup>4</sup>
Poder calórico inferior Aceite Piñón	~36 MJ/kg

Dentro de las simulaciones se ha tomado en cuenta la variación estacional ver la Figura 4, y la curva de demanda de verano e invierno en la Figura 5. Adicionalmente se ha considerado las variaciones de radiación solar, en la Figura 7, e inclusive las variabilidades en la demanda de la isla  $\pm 5\%$ . La curva de eficiencia de los generadores al operar con aceite de piñón ha sido establecida mediante los datos

<sup>4</sup> Los generadores térmicos al operar con aceite de piñón no podrán funcionar a potencias menores al 50% de la nominal. En el caso de operación diesel, estos no podrán operar a potencias menores al 30% de la nominal. Debido al alto índice corrosivo del aceite de piñón se recomienda que los generadores térmicos operen dentro de los límites descritos.

de operación recogidos del Proyecto Piñón Galápagos en su fase 1 desarrollada en isla Floreana, ver en la Figura 9. [6]

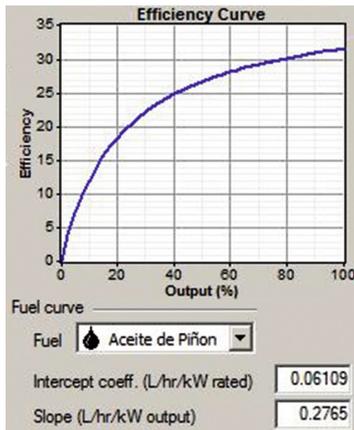


Figura 9: Curva de eficiencia para generador a aceite de piñón

## 6. RESULTADOS

Los resultados de la simulación se presentan a continuación, en la Tabla 4 con un enfoque en las horas de operación de los generadores, el consumo de aceite de piñón y el costo del combustible empleado para cada uno de los tres esquemas de operación planteados. De acuerdo a estos datos se puede concluir que el modo de operación del sistema híbrido que menor costo de operación tiene desde la perspectiva de consumo de combustible es peak shaving. Para la valoración de los costos de operación del sistema, se consideró para el diesel un costo de 5 USD/galón (costo real en Galápagos) y para el aceite de piñón un costo estimado y aún no definido de 3,50 USD/galón (costo real en Galápagos 2012).

Tabla 4: Resultados de la simulación

Modo de operación	Generación Térmica horas	Consumo combustible L/año	Costo combustible USD/año
Generación térmica 100% (Diesel)	8760	120 702	155 945.74
PV + Diesel-off (Aceite Piñón)	5471	94 213	85 205.56
<b>PV + Peak shaving (Aceite Piñón)</b>	<b>4742</b>	<b>87 149</b>	<b>78 816.93</b>

En la Figura 10 se muestran las participaciones de la energía producida de los sistemas: térmico y solar fotovoltaico en los tres tipos de esquemas planteados. Se puede observar claramente que el esquema con mayor aporte de recurso solar (11,78%) es el sistema peak shaving.

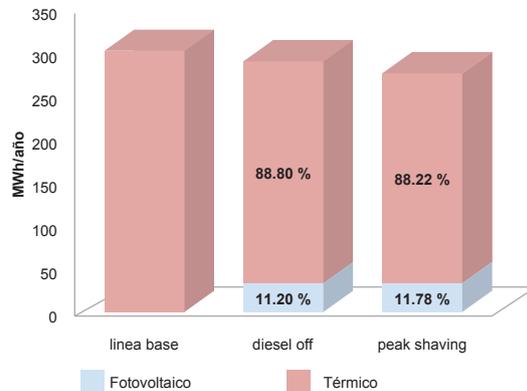


Figura 10: Energía térmica y fotovoltaica

Con el objetivo de analizar los costos a lo largo de la vida útil del proyecto, se implementó el análisis del costo nivelado de energía (siglas en inglés LCOE), en el que se consideran los costos de inversión de los componentes del sistema, los costos de operación y mantenimiento, y la energía total generada del sistema para un periodo determinado. En el caso de este proyecto el periodo de análisis planteado para el costo nivelado de energía es de 5 años.

$$LCOE = \frac{I_{s_0} + \sum_{n=1}^N O\&M}{\sum_{n=1}^N ET} \quad (1)$$

$I_{s_0}$  = Inversión inicial del sistema en USD

$$\sum_{n=1}^5 O\&M$$

= Costos de operación y mantenimiento en USD

$$\sum_{n=1}^5 ET = \text{energía total generada en kWh}$$

Para el análisis del costo nivelado de energía se consideraron los parámetros que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros económicos

Galón de Diesel	5 USD
Galón de Aceite de Piñón	3,5 USD
Porcentaje costos de mantenimiento sistemas térmicos	10%
Porcentaje costos de mantenimiento sistemas fotovoltaicos	3%
Porcentaje costos de mantenimiento sistemas de almacenamiento de energía	2%
Costo kW térmico (en Galápagos)	2 500 USD
Costo kWp fotovoltaico (en Galápagos)	3 500 USD
Costo kWh almacenamiento de energía (en Galápagos)	415 USD

En la Figura 11 se puede observar que el menor costo nivelado de energía de los 5 años de operación del sistema, considerando los tres esquemas planteados se presenta en la configuración de Diesel-off, con un valor de \$ 0,39/kWh. Es necesario señalar que en el caso del sistema de línea base, en el que se contemplaba la configuración de un sistema únicamente abastecido a través de una planta térmica, el costo nivelado de energía es de \$ 0,57/kWh. Sin embargo este esquema, presenta los costos de operación y mantenimiento más altos debido a la dependencia del abastecimiento de combustible fósil. No se consideran los costos de transporte que conlleva el abastecimiento de combustible en isla Floreana.

En el caso del esquema peak shaving, los costos de inversión son los más altos, esto debido a la capacidad del componente del sistema de almacenamiento de energía (288kWh).

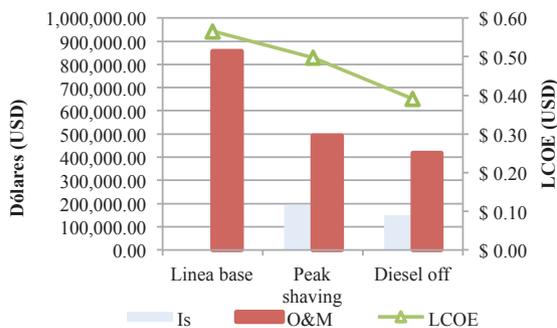


Figura 11: Costo nivelado de energía

En la Figura 12, se muestran los rendimientos de las distintas configuraciones del sistema. Se puede ver claramente que la configuración peak shaving presenta el mayor rendimiento 2,57kWh/gal, esto debido principalmente al mayor aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica que tiene el sistema por la capacidad del sistema de almacenamiento de energía.

En la Tabla 6, se muestra el resumen de resultados obtenidos en el análisis y simulaciones del sistema híbrido Floreana considerando los modos de operación: generación térmica 100%, diesel off y peak shaving. De acuerdo con estos valores, se puede analizar que la mayor penetración de energía solar (11,78 %) y el mayor rendimiento del sistema (12,23kWh/gal) se presenta con la configuración peak shaving, sin embargo si se compara con la configuración diesel-off la variación de penetración de energía solar y rendimiento del sistema tiene una variación de 0,58 % y 0,32kWh/gal respectivamente pero con una diferencia de inversión inicial de cerca de USD 44.000,00.

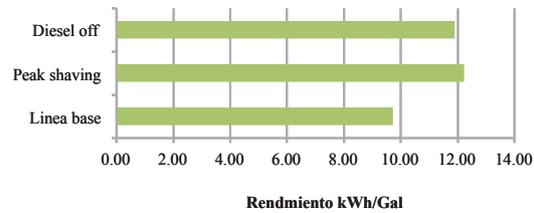


Figura 12: Rendimiento del sistema

Tabla 6: Resumen de resultados

Modo de operación	Inversión del sistema (USD)	Costo O&M (MMUSD)	LCOE (USD/kWh)	Rendimiento (kWh/gal)
Generación térmica 100%	0	857 701,55	2,83	9,71
PV + Diesel-off (Aceite Piñón)	149 500,00	416 650,47	2,06	11,90
PV + Peak shaving (Aceite Piñón)	193 500,00	491 655,56	2,36	12,23

\*Cabe mencionar que el rendimiento del sistema es bajo debido al poder calórico inferior del aceite de Piñón comparado con el poder calórico inferior del Diesel.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con las características del sistema híbrido Floreana, se puede concluir que la mejor opción tanto técnica como económica para la implementación de este sistema, se presenta a través del modo de operación diesel-off. A pesar de que ésta opción presente mayor consumo de combustible, requiere de un banco de baterías menor al de la modalidad peak shaving. La operación diesel-off es además más simple de lograr de forma manual o automatizada, restringiendo simplemente el intervalo del día en la cual los generadores pueden trabajar.

Las simulaciones de la operación de las distintas configuraciones del sistema híbrido Floreana realizadas en el software HOMER, representan una gran ayuda para la toma de decisiones en cuanto al diseño y operación de sistemas híbridos. Las simulaciones tienen alto grado de confiabilidad debido a su modalidad hora-a-hora durante un año completo, además de incluir todos los parámetros técnicos y ambientales requeridos para determinar la generación de energía de fuentes renovables. Es importante mencionar que el software no solo simula un sistema híbrido, sino que optimiza el tamaño de los componentes para mayor participación de energía renovable sin dejar de considerar el costo de la energía.

El proyecto sistema híbrido Floreana significará la primera experiencia en el Ecuador en cuanto a la operación de sistemas fotovoltaicos conectados a red en combinación óptima con generación térmica 100% renovable con biocombustibles, por lo que por parte del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable es de vital importancia dar a conocer los pormenores y fases previas a la implementación del proyecto que pueden significar una solución futura para la generación de energía en el continente.

La penetración de energía solar fotovoltaica máxima lograda con la configuración actual del sistema es del 12%, sin embargo esta penetración podría incrementarse con el aumento de la potencia fotovoltaica hasta 35 kWp, logrando así un mejor rendimiento del sistema, reduciendo el consumo de combustible y optimizando el uso del sistema de almacenamiento de energía.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ELECGALÁPAGOS, «Registro de Operación y Consumo de Combustible para la Isla Floreana». jul-2012.
- [2] Y. Fernández y S. Vaca, «Diagnóstico de la situación actual del sistema de generación fotovoltaico, instalado en la isla Floreana Archipiélago Galápagos». *Renovaenergía*, nov-2009.
- [3] L-E Hägerstedt y C. Martinsson, *Benefits of interconnecting stand-alone PV into a mini grid*. Stockholm - Sweden: ELFORSK, 2006.
- [4] Lahmeyer International, «Diseño final Sistema Híbrido Isabela». Dic-2010.
- [5] IEA International Energy Agency, «PV Hybrid Mini-Grids: Applicable Control Methods for Various Situations». Ene-2012.
- [6] ProViento S.A. Energías Renovables Ecuador, «Informe final de pruebas realizadas a los grupos electrógenos del Proyecto Floreana». Ene-2011.



Adrián Moreno Díaz.- Nació en Quito, Ecuador en 1983. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2008. En 2009, a través de una beca de la Fundazione RETECA participó en el proyecto de investigación “Smart Grids” en la Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, Lugano-Suiza. Sus principales áreas de interés están enmarcadas en la Operación y Planificación de Sistemas Eléctricos mediante la implementación de fuentes renovables de energía.



Pablo Carvajal, nació en Quito.- Ecuador en 1984. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica Nacional en 2008, de Máster en Energía Renovable de la Universidad de Oldenburgo, Alemania en 2012. Sus campos de trabajo están relacionados con centrales de generación fotovoltaica, tecnología *waste-to-energy*, y la integración de energía renovable en la matriz energética.