

Revisión de las estrategias de modelamiento y análisis aplicados a sistemas híbridos de energía

A review of the analysis and modeling strategies applied on energy hybrid systems

Carlos-Andrés Forero-Núñez^I, Jairo Alberto-Valencia^{II}, Fabio-Emiro Sierra-Vargas^{III}

I. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería. Bogotá, Colombia

II. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Bogotá, Colombia

III. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Mecánica. Bogotá, Colombia

Correo electrónico: carlosa.foreron@utadeo.edu.co

Recibido: 5 de octubre de 2015

Aceptado: 3 de diciembre de 2015

Resumen

El constante aumento en la demanda de energía a nivel mundial, la necesidad llevar a cabo procesos más sostenibles y la falta de electricidad en zonas alejadas de las redes de interconexión han causado un mayor interés en el desarrollo de sistemas híbridos de energía que combinen diversas tecnologías. El presente trabajo busca realizar una revisión a las diferentes estrategias empleadas a nivel mundial para el análisis de desempeño, dimensionamiento, modelamiento y evaluación de este tipo de sistemas. Una vez recopilada información derivada de diferentes fuentes académicas se pueden clasificar las estrategias en tres grupos. El primero tiene en cuenta las ecuaciones fundamentales para la evaluación independiente de cada uno de los posibles componentes de los

sistemas híbridos; el segundo considera alternativas basadas en inteligencia artificial como algoritmos genéticos, lógica difusa y redes neuronales; y el tercero se basa en el uso de herramientas computacionales disponibles como HOMER, RETScreen, TRNSYS, HYBRID2, entre otros. El uso de estas herramientas computacionales permite desarrollar simulaciones del comportamiento de sistemas híbridos teniendo en cuenta factores técnicos, ambientales y económicos considerando diferentes escenarios y cambios en parámetros operacionales.

Palabras claves: Sistemas híbridos, energía renovable, inteligencia artificial, HOMER, RETScreen.

Abstract

The continuous increase of the world energy demand, the necessity of supplying it in a more sustainable manner and the lack of electricity in rural areas have promoted the development of hybrid systems capable of combining a wide variety of energy technologies. This work makes a review of the strategies followed to analyze the performance, dimensions, modeling and evaluation of such energy systems. After gathering some academic information available in the literature, we conclude that the strategies could be classified into three major groups. First one is based on fundamental equations applied during evaluation of each component independently; second group includes artificial

intelligence-based strategies like genetic algorithms, fuzzy logic, and neural networks; and the final group is based on the application of computational tools such as HOMER, RETScreen, TRNSYS, HYBRID2, among others. The utilization of computational tools allows to simulate hybrid systems considering technical, environmental and financial factors when different scenarios and operational conditions can be possible.

Key words: Hybrid systems, Renewable energy, Artificial Intelligence, HOMER, RETScreen.

Introducción

El consumo energético a nivel mundial ha aumentado progresivamente durante los últimos años. Mientras que en 1973 la generación de energía eléctrica fue equivalente a 6131 TWh, en 2013 alcanzó los 23322 TWh. Esto indica que en los últimos 40 años la generación de electricidad aumentó cerca de 2,8 veces a una velocidad constante cercana a los 430 TWh/yr. Para lograr suplir esta demanda, se han empleado diversas fuentes de energía aunque cerca del 67,4 % fue generada a partir de fuentes fósiles como el carbón (41,3 %), gas natural (21,7 %) y derivados del petróleo (4,4 %) respectivamente, seguidos por los sistemas hidroeléctricos (16,3 %), las plantas nucleares (10,6 %) y otras fuentes renovables (5,7 %) [1]. Como consecuencia del constante consumo de fuentes fósiles para suplir la demanda de electricidad, diversos problemas a nivel mundial han sido ampliamente observables; entre los cuales caben mencionar los efectos nocivos de los gases de efecto invernadero, la dependencia energética de diversas economías en países que cuentan con dichos recursos, los problemas geopolíticos causados por el control de las reservas de petróleo, el desplazamiento forzoso de algunas comunidades, y la incidencia de la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles en la economía de los países.

Ante estos problemas algunos países como Francia, Alemania, Estados Unidos, Suecia, Japón buscaron incentivar el uso de sistemas energéticos basados en procesos de fisión de elementos principalmente de Uranio para la producción de electricidad en plantas nucleares. Sin embargo, los diversos accidentes originados en estos sistemas tales como el ocurrido en la planta de Fukushima Daiichi en Marzo de 2011 han

causado nuevas prevenciones y una disminución importante de la fiabilidad y conveniencia de este tipo de tecnologías [2]. Teniendo en cuenta estos inconvenientes, el mercado energético ha comenzado a desarrollarse en torno a las diversas fuentes de energía renovable basadas en la radiación solar, energía eólica, biomasa, mareas, olas, recursos hídricos y gradiente térmico.

Como resultado de esta nueva tendencia del mercado energético, las inversiones en nuevos sistemas pasaron de 45 a 270 miles de millones USD. Igualmente importante es que este aumento no ha estado dirigido únicamente por los países desarrollados en donde las inversiones subieron de 36 a 139 miles de millones; sino que también se ha visto en los países en desarrollo donde los fondos pasaron de 9 a 131 miles de millones entre 2004 – 2014 [3]. Entre las principales ventajas que ofrecen estas tecnologías se encuentran la disponibilidad de la fuente energética, la oportunidad de generación mediante sistemas descentralizados, la creación de nuevas industrias y empresas, la posibilidad de generar en zonas rurales, y los bajos costos de operación y mantenimiento.

A pesar del interés de los diferentes gobiernos en aumentar la promoción de estas tecnologías, el porcentaje de generación no ha superado el 7 % excluyendo las grandes hidroeléctricas. Esto se puede relacionar con algunas barreras que deben ser superadas. Algunas de las desventajas de los sistemas de energía renovable se relacionan con los altos costos de inversión inicial, costos elevados de generación de energía eléctrica, bajas eficiencias en comparación con sistemas tradicionales, baja densidad energética de las fuentes, intermitencia en el recurso energético, falta de mayores políticas energéticas y poco conocimiento de las tecnologías existentes especialmente en los países en desarrollo.

Por estos motivos la industria a partir de los procesos de innovación e investigación han desarrollado el concepto de sistemas híbridos para la generación de energía eléctrica y térmica. Estos sistemas híbridos combinan diversas tecnologías de tal manera que sea posible aprovechar las ventajas de las diferentes fuentes, tanto fósiles como renovables, para intentar mitigar algunos de los impactos ambientales más grandes y mejorar la eficiencia energética total. Múltiples trabajos se encuentran disponibles en la literatura internacional relacionando estas tecnologías; muchos de estos varían en la metodología de análisis, dimensionamiento y optimización. Teniendo en cuenta que estos sistemas híbridos se presentan como una solución factible para la implementación de fuentes renovables que trabajen en cooperación con las fuentes tradicionales y renovables, y que son tecnologías confiables para suplir demandas energéticas de mediana y pequeña escala para zonas rurales, este trabajo busca realizar una revisión a las diferentes estrategias empleadas para su dimensionamiento y análisis.

Modelamiento y análisis mediante ecuaciones fundamentales

Desde 2006, diversos autores han llevado a cabo el análisis de sistemas que combinan celdas fotovoltaicas, turbinas eólicas, motogeneradores diésel, y baterías de carga. Deshmukh y Deshmukh [4] realizaron una recopilación de análisis realizados sobre sistemas fotovoltaicos, eólicos, diésel teniendo en cuenta ecuaciones fundamentales, análisis de costos, y pérdida de carga.

Ecuaciones fundamentales para sistemas fotovoltaicos

Para el análisis de los sistemas fotovoltaicos que se encuentran instalados como componentes del sistema híbrido se tienen en cuenta variables tales como la radiación solar total incidente I_T . Esta a su vez puede ser estimada como la suma de la radiación directa normal I_b , radiación difusa I_d , y los factores de inclinación de la radiación difusa y reflejada R_d y R_r . Así mismo, la potencia instantánea P_{PV} [kW] dada por el sistema fotovoltaico estará dada por el área A_{pv} [m^2], la radiación instantánea I_T [W/m^2] y la eficiencia del sistema η .

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + (I_b + I_d) R_r \quad (1)$$

$$P_{PV} = I_T \cdot \eta \cdot A_{pv} \quad (2)$$

Ecuaciones fundamentales para turbinas eólicas

La evaluación de las turbinas eólicas debe tener en cuenta el factor de disponibilidad de vientos, la distribución de Weibully rosa de vientos. Así mismo, varios autores consideran la ecuación de potencia para establecer el la velocidad de viento a la altura del rotor, donde V_z , V_i [m/s] equivalen a las velocidades a la altura del rotor (Z) y a la de referencia a la altura Z_i [m] junto con el factor de cizallamiento α (5). Factor de cizallamiento que depende del tipo de superficie en donde se desarrollaron las mediciones.

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_{pc} \cdot P_f \quad (3)$$

$$\eta_m = \eta_r \cdot (1 - \beta \cdot (T_c - T_r)) \quad (4)$$

Ecuaciones fundamentales para turbinas eólicas

La evaluación de las turbinas eólicas debe tener en cuenta el factor de disponibilidad de vientos, la distribución de Weibully rosa de vientos. Así mismo, varios autores consideran la ecuación de potencia para establecer el la velocidad de viento a la altura del rotor, donde V_z , V_i [m/s] equivalen a las velocidades a la altura del rotor (Z) y a la de referencia a la altura Z_i [m] junto con el factor de cizallamiento α [5]. Factor de cizallamiento que depende del tipo de superficie en donde se desarrollaron las mediciones.

$$V_z = V_i * \left(\frac{Z}{Z_i} \right)^\alpha \quad (5)$$

Una vez establecida la velocidad, se hace un análisis de la potencia instantánea generada empleando la curva de potencia de las diferentes turbinas de viento. Esta curva de potencia es suministrada por los fabricantes; aunque investigaciones se han desarrollado para evaluar el comportamiento real de las turbinas y el ideal basado en estos parámetros técnicos [6]. Para llevar a cabo el análisis de este tipo de sistemas Malheiro et al. [7], realizaron el análisis de la curva de potencia de diferentes turbinas de viento y establecieron una ecuación que se ajusta al comportamiento de la curva de potencia. De esta manera la energía entregada está dada por la ecuación 6, donde P_{WT} es la potencia entregada [kW], u_z [m/s] es la velocidad del viento, y a_i , b_i , c_i son coeficientes de la regresión.

$$E_{wt(t)} = P_{wt} * \left[a_1 * e^{-\left(\frac{u_z(t)-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 * e^{-\left(\frac{u_z(t)-b_2}{c_2}\right)^2} + a_3 * e^{-\left(\frac{u_z(t)-b_3}{c_3}\right)^2} \right] * \Delta t \quad (6)$$

Ecuaciones fundamentales para electrogeneradores

Generalmente los electrogeneradores están constituidos por motores de combustión interna que transforman la energía química de combustibles bien sea líquidos o gaseosos en energía mecánica a través del movimiento de los pistones y su posterior transformación en energía eléctrica a través de generadores eléctricos. El análisis de estos electrogeneradores ha sido analizado de manera independiente por diversos autores a nivel nacional e internacional [8, 9]. Entre las principales relaciones que se tienen en cuenta durante el dimensionamiento del motor se encuentran la potencia entregada (P_{WT}) [kW] y el rendimiento calórico del mismo HR [kJ/kWh]

$$P_{WT} = \eta_{total} * \dot{m}_{fuel} * LHV_{fuel} \quad (7)$$

$$\eta_{total} = \eta_{freno} * \eta_{generador} \quad (8)$$

$$HR = 3600 / \eta_{total} \quad (9)$$

Generalmente los electrogeneradores son empleados bien sea para cargar las baterías de los sistemas híbridos o como sistemas de apoyo para cubrir cargas pico [4].

Ecuaciones de análisis para bancos de baterías

A pesar de los diferentes impactos asociados al uso de bancos de baterías para el almacenamiento de energía eléctrica, son dispositivos ampliamente empleados en sistemas híbridos con el ánimo de cubrir picos y variaciones en la demanda energética del sistema. Esto teniendo en cuenta que frecuentemente se presentan amplias diferencias entre la demanda de energía y la capacidad de generación de los sistemas basados en fuentes renovables. El dimensionamiento del banco B_{rc} [Amph] se encuentra asociado a factores tales como la carga de la batería $E_{c(Ah)}$ [Amph], la autonomía o número de días de almacenamiento esperado D_s , el máximo nivel de descarga DOD_{max} , el factor de corrección por temperatura η_t .

$$B_{rc} = \frac{E_{c(Ah)} * D_s}{DOD_{MAX} * \eta_t} \quad (10)$$

Análisis a partir de estrategias alternativas de Inteligencia Artificial

En ocasiones es difícil conocer con precisión información relacionada con los datos meteorológicos debido al difícil acceso de los lugares en los cuales se quiere emplear el sistema híbrido. Por esto algunos investigadores han llevado a cabo trabajos con el ánimo de establecer estrategias alternativas con las cuales poder realizar el dimensionamiento, modelamiento y análisis de desempeño de los equipos. Algunas de estas estrategias se basan en inteligencia artificial mediante aplicación de redes neuronales, lógica difusa, algoritmos genéticos, o métodos híbridos [10].

Aplicación de algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son una herramienta útil para el análisis de variables y la optimización de sistemas basados en la teoría de selección natural de Darwin; estos han sido ampliamente empleados en problemas de diversa índole para diferentes campos de la ingeniería en los cuales los parámetros de entrada no son suficientes [11-13]. Senju et al. [14] llevaron a cabo el análisis de un sistema híbrido para la isla Miyako, Kume y Tokashiki con una demanda pico de 50, 11 y 3,5 MW respectivamente; el sistema consistió de paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, un motogenerador y un banco de baterías. Teniendo en cuenta ecuaciones de desempeño para cada uno de los subsistemas, emplearon un algoritmo genético (GA) para la definición del punto más adecuado de operación considerando igualmente el mínimo costo de operación. Utilizando este algoritmo lograron una reducción del 10% del costo de operación en comparación del caso base en el cual la generación se da únicamente mediante motogeneradores diésel.

De igual manera Koutroulis et al. [15] emplearon esta técnica para la evaluación de un sistema híbrido conformado por un sistema fotovoltaico y unas turbinas eólicas. Luego de establecer las diferentes ecuaciones para la optimización de los costos de operación, emplearon el algoritmo para la evaluación del sistema con coordenadas geográficas 35°31'48" N y 24°03'35" E. Este algoritmo genético sigue una optimización multi-objetivo por la cual se busca identificar el mínimo punto del costo total de operación sumando los diversos costos de operación de cada uno de los sistemas que intervienen en el sistema híbrido. Como consecuencia de esto, el algoritmo define una función de desempeño que debe ser maximizada considerando diversos límites superiores e inferiores. Una vez que se ejecuta el algoritmo se evalúa su pertinencia, en caso de no ser el punto óptimo se siguen una serie de operadores de entrelazamiento y de mutación para establecer nuevas cromosomas que entran como materia prima a la evaluación de la función de desempeño. Al evaluar el sistema lograron identificar la cantidad de equipos necesarios para el funcionamiento óptimo de un sistema híbrido Fotovoltaico / eólico a 20 años en comparación con el funcionamiento del sistema independiente fotovoltaico o eólico.

Aplicación de estrategias basadas en redes neuronales

El uso de redes neuronales para el dimensionamiento de sistemas energéticos ha sido posible mediante la aplicación de algoritmos en los cuales se manejan diversos procesos interconectados en los cuales cada variable de entrada posee un peso de entrada que posteriormente genera una respuesta al proceso. Teniendo una serie de valores resultantes de diversos puntos de operación de los sistemas híbridos es posible llegar a entrenar estas redes de tal forma que sean capaces de responder de una mejor manera a cualquier perturbación causada por la variación de alguno de los parámetros de entrada o de operación [10]. Ata [16] presenta un amplio resumen de diversos trabajos que se relacionan con el uso de redes neuronales para el modelamiento, identificación, optimización, predicción, control y clasificación de sistemas eólicos. Así mismo, se han empleado redes neuronales para el análisis energético y/o exergético de sistemas de refrigeración mediante sistemas de compresión de vapor, de absorción, predicción de propiedades de refrigerantes, control de sistemas de aire acondicionado y bombas de calor, así como sistemas de calentamiento de aire de ventilación [17].

Algunas de las típicas configuraciones empleadas durante el desarrollo y la aplicación de las redes neuronales incluyen las redes multi-capa de alimentación hacia adelante (MLFNN) caracterizadas por una capa de entrada seguida de diversas capas ocultas y una capa de salida que se alimentan mediante algoritmos de entrenamiento de propagación inversa. Algunos de los trabajos basados en este tipo de red neuronal se encuentran en las referencias [18-20]. Otra de las configuraciones empleadas para el análisis de estos sistemas incluye las redes neuronales de función radial (RBFN); esta configuración presenta una convergencia más rápida, menores errores de extrapolación y una mayor confiabilidad en comparación a la anterior debido al uso de una función de transferencia tipo Gauss que emplea entradas ponderadas para producir una salida del algoritmo.

Una tercera configuración es la red neuronal de regresión generalizada (GRNN) que se basan en redes que operan mediante funciones de densidad de probabilidad. Resultados de aplicaciones de estas configuraciones han sido expuestas por Yao et al [21] y Swider et al [22]. Las redes neuronales han sido igualmente empleadas en sistemas fotovoltaicos bien sea para el dimensionamiento de equipos o para la estimación de datos de radiación solar [23, 24]. Al respecto, Mellit y Kalogirou [25] presentan una completa revisión al uso de redes neuronales para evaluación de radiación solar incluyendo más de 25 referencias entre 1994 y 2008.

Similar a esto, Lima et al. llevaron a cabo el análisis de la radiación solar en la región noreste de Brasil empleando este tipo de redes neuronales. Mediante este trabajo fue posible presentar una metodología para reducir las variaciones de los estimativos de radiación solar basada en redes multicapa [26]. De igual manera, Rezk y Hasaneen [27] presentan una aplicación de redes neuronales para llevar a cabo el seguimiento del máximo punto de operación de un sistema PV basado en celda solares de triple capa InGaP/InGaAs/Ge. En este caso se empleó una red multicapa tipo MLFNN para la simulación junto con una aplicación computacional desarrollada en Matlab/Simulink. Mediante la aplicación de esta estrategia de optimización fue posible aumentar la energía generada por día en un 11,28 % pasando de 3,37 kWh a 3,75 kWh.

Uso de lógica difusa en sistemas híbridos de generación

Las estrategias basadas en la lógica difusa tienen una gran aplicación cuando los parámetros de entrada presentan una alta variación e inestabilidad [10]. Athari y Ardehali examinan los efectos de la variación de precios en el desempeño de los componentes de sistemas renovables híbridos mediante controladores optimizados de lógica difusa [28]. Este trabajo incluyó el análisis de turbinas de viento, bancos de baterías, electrolizadores para la producción de hidrógeno como alternativa de almacenamiento de energía, celdas de combustible y tanques de almacenamiento de hidrógeno.

Dentro de las principales ventajas del uso de sistemas de lógica difusa se encuentran la posibilidad de usar múltiples variables de entrada sin aumentar la complejidad del modelo matemático, no requiere datos históricos como sucede con las redes neuronales [29]. Safari et al. desarrollaron un controlador de lógica difusa para el análisis de un sistema híbrido basado en un algoritmo de optimización de partículas de enjambre (Particles

warm optimization) que incluyó una serie de turbinas de viento junto con un arreglo de paneles fotovoltaicos, electrolizador, banco de baterías, tanque de almacenamiento de hidrógeno y celda de combustible. El resultado de la experimentación indicó una disminución en los costos de operación y mantenimiento (O & M) junto con una reducción en la probabilidad de pérdida de capacidad de generación del 57 % y 33 %, respectivamente [30].

De manera similar, Putrayuha et al. [31] aplican estrategias de lógica difusa para el análisis del comportamiento de un sistema híbrido compuesto de un arreglo fotovoltaico térmico (PVT) junto con un sistema geotérmico. Al analizar estos sistemas mediante los controladores de lógica difusa fue posible disminuir alrededor de un 13,3 % la energía del sistema de bomba de calor y un 18,3% la energía consumida del sistema híbrido bomba de calor/arreglo fotovoltaico-térmico. Interesante remarcar que en estos casos se aplican tecnologías que buscan aprovechar no solo la energía eléctrica producida por el sistema tradicional fotovoltaico, sino que adicionalmente se aprovecha el calor residual, tradicionalmente perdido de los paneles fotovoltaicos, aumentando la eficiencia energética del sistema híbrido solar [32, 33]. Así mismo, algunos autores han empleado estrategias de lógica difusa para la evaluación de sistemas híbridos en redes aisladas no conectadas a la red central.

Tarkeshwar y Mokherjee [34] analizaron un sistema híbrido constituido por una turbina eólica y un generador diésel mediante la aplicación de algoritmos de lógica difusa incluyendo alternativas de almacenamiento como baterías, super capacitores y sistemas de almacenamiento de superconductores magnéticos. El resultado demostró una disminución en las fluctuaciones de frecuencia y potencia en el sistema; lo cual es de gran importancia para el modelamiento de sistemas híbridos que sean instalados en zonas rurales alejadas de las redes de interconexión. Otro sistema híbrido compuesto por una turbina eólica junto a un generador diésel fue analizado por Mohanty et al [35] empleando estrategias de lógica difusa. Al igual que los resultados presentados anteriormente, este trabajo obtuvo sistemas con parámetros operacionales más estables.

Aplicación de herramientas computacionales para el análisis de sistemas energéticos

Con el ánimo de permitir el análisis y modelamiento de sistemas energéticos constituidos por una o múltiples tecnologías basadas en fuentes fósiles o alternativas, varios laboratorios e instituciones han desarrollado herramientas computacionales. Algunas de estas tales incluyen las ecuaciones fundamentales de las tecnologías, junto con ecuaciones financieras para el análisis de los costos de operación, mantenimiento, capital permitiendo la estimación de puntos de operación y parámetros de diseño adecuados para minimizar costos nivelados de energía (LCOE) o de operación y mantenimiento. Así mismo, permiten el análisis del impacto ambiental e incluyen variables como la venta de bonos verdes para la simulación de los sistemas. Ejemplos de estos programas son HOMER, HYBRID2, PVSOL, RAPSIM, TRNSYS, y RETScreen.

HOMER

HOMER es un software, desarrollado por el laboratorio nacional de energía renovable de Estados Unidos (NREL), que permite llevar a cabo el análisis de diversos sistemas híbridos teniendo en cuenta análisis de sensibilidad y optimización a partir de la definición de tecnologías, costos, cargas de demanda y disponibilidad de recursos. Mediante esta herramienta Marneni et al [36] analizaron la ubicación y características que debe tener un sistema para suplir una demanda de 3,06 MW pico en Mysuru, Karnataka, India empleando un arreglo de paneles fotovoltaicos. Encontraron que mediante el análisis detallado y la buena selección de la ubicación es posible mejorar características de estabilidad evitando altas pérdidas de energía, problemas de regulación de voltaje, sobrecargas o interrupciones del servicio.

De igual manera, Sen y Bhattacharyya [37] evaluaron, empleando esta herramienta, la conveniencia y pertinencia del uso de un sistema híbrido para la generación de energía eléctrica para una población remota en Palari, estado de Chhattisgarh, India. Entre las tecnologías analizadas se encontraron sistemas hídricos de pequeña escala, sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas y generadores de biodiesel. El resultado de la simulación indicó la posibilidad de aplicar un sistema híbrido con un costo de generación equivalente a 0,420 USD/kWh. Hafez y Bhattacharyya [38] llevaron a cabo el análisis de un sistema híbrido para definir del diseño óptimo que minimizara el costo de ciclo de vida teniendo en cuenta el impacto ambiental. Cuatro casos consideraron variando las tecnologías disponibles. El primer escenario se basó en el uso de un sistema basado en un generador diésel capaz de suplir la demanda; el segundo incluyó un sistema eólico, solar fotovoltaico, una pequeña central hidroeléctrica, banco de baterías y un convertidor; el tercer escenario mezcló el sistema diésel con los anteriormente mencionados en el tercer caso; y finalmente el cuarto caso se basó en suplir la demanda a partir de una red de interconexión externa. Teniendo en cuenta los costos por combustible, el impacto ambiental y los resultados generados de la simulación empleando HOMER, concluyeron que el tercer escenario es el mejor en términos de costo-efectividad.

Similar análisis fue desarrollado por Lau et al [39] empleando esta herramienta y analizando un sistema fotovoltaico/diésel para condiciones de radiación que varían entre 4,8 y 6,1 kWh/m² generando aproximadamente 5,51 kWh/m²/día y un costo de diésel cercano a los 0,49 USD/litro. Entre las principales conclusiones obtenidas de este estudio se encuentran que el uso del sistema fotovoltaico permite la

disminución de la dependencia en el combustible fósil aunque al emplear el banco de baterías el valor presente neto y el costo de energía no presentan una mayor reducción.

Himri et al [40] plantean el análisis de un sistema híbrido compuesto por una turbina eólica y un motogenerador diésel para una zona rural aislada en el sur oeste de Algeria. Para ello llevaron a cabo una simulación empleando HOMER, y una demanda pico de 250 kW; la variación del viento se encuentra entre los 2 y 12 m/s y un costo de diésel equivalente a 0,162 USD/litro. Fue posible evaluar la factibilidad del sistema para velocidades de viento superiores a 5,48 m/s y costos mayores o iguales al establecido y una reducción de aproximadamente 500 toneladas de CO₂ por año. Otros análisis han sido igualmente desarrollados empleando esta herramienta computacional; algunos de ellos para sistemas híbridos PV/eólicos [41], PV/diesel [42], Eólico/diesel [43], pequeña central hidroeléctrica/motor de combustión interna [44], gasificador/diesel [45]; mostrando así ser útil para el análisis de sistemas híbridos combinados a partir de distintas tecnologías basadas en fuentes tanto renovables y fósiles.

RETScreen

RETScreen es una herramienta computacional para el análisis de diversos sistemas energéticos que van desde tecnologías simples para la generación de potencia a partir de fuentes fósiles tradicionales, tecnologías basadas en fuentes renovables, hasta el análisis de eficiencia energética para el sector residencial, comercial o industrial, incluyendo la evaluación de sistemas híbridos de generación, cogeneración o trigeneración. Este programa ha sido desarrollado a partir del trabajo conjunto de instituciones gubernamentales, industria y la academia en Canadá. Esta herramienta mantiene una metodología comparativa entre dos diferentes escenarios el caso base y el propuesto y permite la evaluación de aspectos técnicos como la cantidad de energía térmica y eléctrica generada; aspectos financieros como la tasa interna de retorno del proyecto o el tiempo de repago; y aspectos ambientales como la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se generan o reducen según sea el caso. Al igual que HOMER son herramientas de descarga gratuita; aunque a diferencia del anterior esta no exige licencia después de un tiempo de prueba. De acuerdo con Connolly et al (46), esta herramienta se encuentra en primer lugar en términos de número de descargas, seguida por otras como HOMER, LEAP, BHP, EnergyPRO.

Kikuchi et al. [47] plantean una evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y análisis del comportamiento energético de sistemas de generación residencial empleando RETScreen. Entre las tecnologías consideradas se encuentran bombas de calor basadas en sistemas geotérmicos, sistemas fotovoltaicos, estrategias de eficiencia energética tales como cambios de luminarias instaladas en Ottawa, Toronto, Montreal, Calgary, y Vancouver, Canadá. Un caso similar fue desarrollado por Bakos et al [48], quienes realizaron una evaluación de un sistema fotovoltaico instalado en un edificio conectado a la red en el Norte de Grecia. La capacidad del sistema analizado era equivalente a 4000 kWh de energía por año y los resultados encontraron que es posible alcanzar puntos de equilibrio del flujo de caja acumulado cercanos a 15 años con subsidios del 60 %.

Siguiendo con el mismo tipo de tecnología renovable, El-Shimy [49] presenta un análisis de la factibilidad técnico-económica para la instalación de una planta de generación fotovoltaica en Egipto con capacidad de 10 MW. Dentro de las variaciones que permite el uso de RETScreen y que fueron analizadas en este estudio se encuentra el cambio de las condiciones meteorológicas; más de 25 locaciones fueron consideradas para establecer los lugares en los cuales la instalación de la planta presenta los mejores parámetros financieros. La mínima cantidad de energía generada se da en Safaga (24202 GWh/año) mientras que la máxima ocurre en WahatKharga (29493 GWh/año). Esta herramienta también ha sido empleada en el análisis de otros tipos de tecnología como Solar térmica o eólica. La factibilidad del uso de calentadores solares térmicos para producción de agua caliente en Libanoha sido evaluada; algunos de los aspectos obtenidos de la aplicación de esta herramienta computacional permitieron establecer la necesidad de disminuir los costos de instalación por metro cuadrado, promover el apoyo a través de políticas energéticas para así lograr disminuir el tiempo de repago definido en nueve años según los diferentes escenarios analizados [50]. Un estudio para la evaluación de un parque eólico de 30 turbinas de 1MW cada una en Algeria fue desarrollado, identificando que una reducción de 900 miles de toneladas de gases de efecto invernadero pueden ser reducidas en promedio durante el tiempo de vida del proyecto [51].

HYBRID2, PVSOL, entre otras

HYBRID2, PV SOL, RAPSIM y TRNSYS son otras herramientas computacionales empleadas para el análisis de sistemas híbridos. El primero fue desarrollado por el laboratorio de energía renovables de Estados Unidos junto con la Universidad de Massachusetts, y permite el análisis de sistemas empleando información de series de datos a largo plazo; no tiene en cuenta fluctuaciones del sistema causados por estados dinámicos. Aunque su popularidad ha sido menor al HOMER, algunos trabajos se han desarrollado con esta herramienta. Mills y Al-Hallaj [52] llevaron a cabo una simulación de un sistema híbrido integrado por un arreglo fotovoltaico de 6,5 kWe, una turbina de viento de 12 kW, una celda de combustible de 2 kW, un electrolizador de 8 kW, y un compresor de hidrógeno de 3 kW. Entre las principales conclusiones cabe destacar que el uso de los sistemas de hidrógeno es solo adecuado para condiciones de laboratorio debido principalmente a los altos costos asociados con la instalación de estos componentes; costos que son mayores a los relacionados con el

uso tradicional de sistemas basados en motores de combustión interna. TRNSYS es una herramienta disponible por más de 35 años, desarrollada por la Universidad de Wisconsin para el análisis transiente de sistemas energéticos. En comparación con los otros sistemas este solo permite el análisis de tecnologías solares, eólicas entre otros sin posibilidad de desarrollar procesos de optimización.

Al respecto Rockendorf et al. [53] llevaron a cabo el análisis de un sistema de cogeneración termoeléctrico mediante el uso de colectores solares híbridos empleando esta herramienta. Así mismo, Kalogirou [54] emplea esta herramienta para el análisis de un sistema compuesto por un Panel fotovoltaico instalado a un intercambiador de aleta capaz de emplear el calor derivado de la radiación incidente para posteriormente generar energía térmica. El sistema híbrido presenta un aumento en la eficiencia del sistema y de la energía total generada para una residencia cubriendo aproximadamente el 49 % de la demanda de agua caliente. Algunas de estas herramientas computacionales junto con otras como iHOGA, SOMES, SOLSIM, ARES-I & II, INSEL, HybSim, SOLSTOR, IPSYS, HybridDesigner, iGRHYSO también empleadas para el análisis de sistemas híbridos de energía han sido recopiladas por Sinha y Chandel [55].

Conclusiones

Mediante este trabajo se realizó una revisión a las diferentes estrategias empleadas a nivel mundial para el análisis de desempeño, dimensionamiento, modelamiento y evaluación de este tipo de sistemas. Una vez recopilada información derivada de diferentes fuentes académicas se encontraron análisis desarrollados que pueden ser clasificados en tres grandes grupos. El primero tuvo en cuenta solo algunas de las ecuaciones fundamentales para la evaluación independiente de cada uno de los posibles componentes de los sistemas híbridos; el segundo consideró alternativas basadas en inteligencia artificial como algoritmos genéticos, lógica difusa y redes neuronales; y el tercero se basó en el uso de herramientas computacionales disponibles como HOMER, RETScreen, TRNSYS, HYBRID2, entre otros.

Aunque son varios los análisis de sistemas híbridos llevados a cabo a partir de ecuaciones fundamentales, estrategias de inteligencia artificial y herramientas computacionales, la literatura no refleja mayores trabajos realizados en Latinoamérica y en especial en Colombia. Esto indica que a pesar de tener ciertas condiciones para la adecuada instalación de sistemas híbridos la investigación en esta área está aún en su infancia. Algunas de las ventajas encontradas respecto al uso de las herramientas computacionales están relacionadas con la posibilidad de llevar a cabo simulaciones de sistemas híbridos variando diferentes escenarios, ubicaciones, condiciones de operación técnicas para establecer así parámetros financieros que permitan tomar decisiones y promover la adecuada instalación de estos sistemas. De igual manera programas como HOMER y RETScreen han demostrado ser versátiles para el análisis de diferentes sistemas que incluyan tecnologías tradicionales y/o renovables.

Referencias

1. International Energy Agency. Key World Energy Statistics. In: Paris: IEA; 2015. Disponible en: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics-2015.html>
2. Behar O, Khellaf A, Mohammedi KA. Review of Studies on Central Receiver Solar Thermal Power Plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;23(7):12-39. ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.017>.
3. Renewable Energy Policy. Network for the 21st Century. In: *Renewables 2015 Global Status Report Key Findings*; Paris, France; 2015. Disponible en: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/GSR2015_KeyFindings_lowres.pdf
4. Deshmukh MK, Deshmukh SS. Modeling of Hybrid Renewable Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008;12(1):235-49. ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.011>.
5. Ritter M, et al. Designing an Index for Assessing Wind Energy Potential. *Renewable Energy*. 2015;83(11):416-24. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.038>.
6. Pagnini LC, Burlando M, Repetto MP. Experimental Power Curve of Small Size Wind Turbines in Turbulent Urban Environment. *Applied Energy*. 2015;154(9):112-21. ISSN 0306-2619. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.117>.
7. Malheiro A, Castro PM, Lima RM, et al. Integrated Sizing and Scheduling of Wind/PV/Diesel/Battery Isolated systems. *Renewable Energy*. 2015;83(11):646-57. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.066>.
8. Forero Núñez C, Eduardo Arango J, Sierra Vargas F. Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kW_e en modo diesel-gas licuado de petróleo. *Ingeniería Mecánica*. 2014;17(3):205-15. ISSN 1815-5944.
9. Sahoo BB, Sahoo N, Saha UK. Effect of Engine Parameters and Type of Gaseous Fuel on the Performance of Dual-Fuel Gas Diesel engines A Critical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13(6-7):1151-84. ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.003>.
10. Bajpai P, Dash V. Hybrid renewable energy systems for power generation in stand alone applications. *A Review Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(6):2926-39. ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.009>.
11. Fu X, Ricci S, Bisagni C. Minimum weight design for three dimensional woven composite stiffened panels using neural networks and genetic algorithms. *Composite structures*. 2015;134(12):708-15. ISSN 0263-8223. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.077>.
12. Oliveira SAF, Rocha Neto AR, Bezerra FN. A novel genetic algorithms and surf based approach for image retargeting. *Expert systems with applications*. 2016;44(2):332-43. ISSN 0957-4174. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2015.09.015>.
13. Caredda M, et al. Prediction of fatty acid content in sheep milk by mid infrared spectrometry with a selection of wavelengths by genetic algorithms. *LWT Food science and technology*. 2016;65(1):503-10. ISSN 0023-6438. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.048>.

14. Senjyu T, et al. Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy. *Renewable Energy*. 2007;32(11):1917-33. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2006.09.003>.
15. Koutroulis E, Kolokotsa D, Potirakis A, et al. Methodology for optimal sizing of stand alone photovoltaic/wind generator systems using genetic algorithms. *Solar energy*. 2006;80(9):1072-88. ISSN 0038-092X. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.002>.
16. Ata R. Artificial neural networks applications in wind energy systems. *A review renewable and sustainable energy reviews*. 2015;49(9):534-62. ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.166>.
17. Mohanraj M, Jayaraj S, Muraleedharan C. Applications of artificial neural networks for refrigeration, air-conditioning and heat pump systems. *A Review Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(2):1340-58. ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.10.015>.
18. Kocabas F, Korkmaz M, Sorgucu U, et al. Modeling of heating and cooling performance of counter flow type vortex tube by using artificial neural network. *International Journal of Refrigeration*. 2010;33(5):963-72. ISSN 0140-7007. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.02.006>.
19. Tosun M, Dincer K. Modelling of a Thermal Insulation System Based on the Coldest Temperature Conditions by using Artificial Neural Networks to Determine Performance of Building for Wall Types in Turkey. *International Journal of Refrigeration*. 2011;34(1):362-73. ISSN 0140-7007. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.08.001>.
20. Khayyam H, Kouzani AZ, Hu EJ, et al. Coordinated energy management of vehicle air conditioning system. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(5):750-64. ISSN 1359-4311. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.10.022>.
21. Yao Y, Lain Z, Hou Z, et al. An Innovative air conditioning load forecasting model based on RBF neural network and combined residual error correction. *International Journal of Refrigeration*. 2006;29(4):528-38. ISSN 0140-7007. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.10.008>.
22. Swider DJ, Browne MW, Bansal PK, et al. Modelling of vapour compression liquid chillers with neural networks. *Applied Thermal Engineering*. 2001;21(3):311-29. ISSN 1359-4311. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00036-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00036-3).
23. Zarzalejo LF, Ramirez L, Polo J. Artificial intelligence techniques applied to hourly global irradiance estimation from satellite derived cloud index. *Energy*. 2005;30(9):1685-97. ISSN 0360-5442. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.047>.
24. Alam S, Kaushik SC, Garg SN. Computation of beam solar radiation at normal incidence using artificial neural network renewable. *Energy*. 2006;31(10):1483-91. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.07.010>.
25. Mellit A, Kalogirou SA. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: a review. *Progress in energy and combustion science*. 2008;34(5):574-632. ISSN 0360-1285. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.peccs.2008.01.001>.
26. Lima FJL, et al. Forecast for surface solar irradiance at the brazilian northeastern region using NWP model and artificial neural networks. *Renewable Energy*. 2016;87(1):807-18. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.005>.
27. Rezk H, Hasaneen EA. New MATLAB/Simulink model of triple junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems. *Ain Shams Engineering Journal*. 2015;6(3):873-81. ISSN 2090-4479. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2015.03.001>.
28. Athari MH, Ardehali MM. Operational performance of energy storage as function of electricity prices for on grid hybrid renewable energy system by optimized fuzzy logic controller. *Renewable Energy*. 2016;85(1):890-902. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.055>.
29. Bilodeau A, Agbossou K. Control analysis of renewable energy system with hydrogen storage for residential applications. *Journal of power sources*. 2006;162(2):757-64. ISSN 0378-7753. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.04.038>.
30. Safari S, Ardehali MM, Sirizi MJ. Particle swarm optimization based fuzzy logic controller for autonomous green power energy system with hydrogen storage. *Energy conversion and management*. 2013;65(1):41-9. ISSN 0196-8904. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.012>.
31. Andrew putrayudha S, et al. A study of photovoltaic/thermal (PVT) ground source heat pump hybrid system by using fuzzy logic control. *Applied Thermal Engineering*. 2015;89(10):578-86. ISSN 1359-4311. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.019>.
32. Tiwari A, Barnwal P, Sandhu GS, et al. Energy metrics analysis of hybrid photovoltaic (PV) modules. *Applied Energy*. 2009;86(12):2615-25. ISSN 0306-2619. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.020>.
33. Solanki SC, Dubey S, Tiwari A. Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors. *Applied Energy*. 2009;86(11):2421-8. ISSN 0306-2619. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.013>.
34. Tarkeshwar, Mukherjee V. A novel quasi oppositional harmony search algorithm and fuzzy logic controller for frequency stabilization of an isolated hybrid power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015;66(3):247-61. ISSN 0142-0615. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.050>.
35. Mohanty A, Viswavandya M, Mohanty S, et al. Reactive power compensation in a stand alone wind diesel tidal hybrid system by a fuzzy logic based UPFC. *Procedia Computer Science*. 2015;57:1281-8. ISSN 1877-0509. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.436>.
36. Marneni A, Kulkarni AD, Ananthapadmanabha T. Loss reduction and voltage profile improvement in a rural distribution feeder using solar photovoltaic generation and rural distribution feeder optimization using HOMER. *Procedia Technology*. 2015;21:507-13. ISSN 2212-0173. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2015.10.036>.
37. Sen R, Bhattacharyya SC. Off grid electricity generation with renewable energy technologies in india: an application of HOMER. *Renewable Energy*. 2014;62(2):388-98. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.028>.
38. Hafez O, Bhattacharya K. Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids. *Renewable Energy*. 2012;45(9):7-15. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.087>.
39. Lau KY, et al. Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under malaysian conditions. *Energy*. 2010;35(8):3245-55. ISSN 0360-5442. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.008>.
40. Himri Y, Boudghene Stambouli A, Draoui B, et al. Techno economical study of hybrid power system for a remote village in algeria. *Energy*. 2008;33(7):1128-36. ISSN 0360-5442. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2008.01.016>.
41. Nandi SK, Ghosh HR. Prospect of wind pv battery hybrid power system as an alternative to grid extension in bangladesh. *Energy*. 2010;35(7):3040-7. ISSN 0360-5442. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.044>.
42. Al Karaghoulia A, Kazmerski LL. Optimization and life cycle cost of health clinic pv system for a rural area in southern iraq using HOMER software. *Solar Energy*. 2010;84(4):710-4. ISSN 0038-092X. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.01.024>.
43. Silveira EF, De Oliveira TF, Junior AC. Hybrid energyscenarios for fernando de noronha archipelago. *Energy Procedia*. 2015;75(8):2833-8. ISSN 1876-6102. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.564>.
44. Nfah EM, Ngundam JM, Vandenberg M, et al. Simulation of off grid generation options for remote villages in cameroon. *Renewable Energy*. 2008;33(5):1064-72. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2007.05.045>.
45. Montuori L, Alcázar Ortega M, Álvarez Bel C, et al. Integration of renewable energy in microgrids coordinated with demand response resources: Economic evaluation of a biomass

- gasification plant by homer simulator. *Applied Energy*. 2014;132(11):15-22. ISSN 0306-2619. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.075>.
46. Connolly D, Lund H, Mathiesen BV, et al. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*. 2010;87(4):1059-82. ISSN 0306-2619. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>.
47. Kikuchi E, Bristow D, Kennedy CA. Evaluation of region-specific residential energy systems for ghg reductions: Case studies in canadian cities. *Energy Policy*. 2009;37(4):1257-66 ISSN 0301-4215. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.004>.
48. Bakos GC, Soursos M, Tsagas NF. Technoeconomic assessment of a building integrated pv system for electrical energy saving in residential sector. *Energy and Buildings*. 2003;35(8):757-62. ISSN 0378-7788. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00229-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00229-3).
49. El Shimy M. Viability analysis of pv power plants in Egypt. *Renewable Energy*. 2010;34(10):2187-96 ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.010>.
50. Hourri A. Solar water heating in lebanon: Current status and future prospects. *Renewable Energy*. 2006;31(5):663-75. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.003>.
51. Himri Y, Boudghene Stambouli A, Draoui B. Prospects of wind farm development in algeria. *Desalination*. 2009;239(1):130-8. ISSN 0011-9164. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.013>.
52. Mills A, Al Hallaj S. Simulation of hydrogen based hybrid systems using hybrido. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2004;29(10):991-9. ISSN 0360-3199. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.004>.
53. Rockendorf G, Sillmann R, Podlowski L, et al. PV-Hybrid and thermoelectric collectors. *Solar Energy*. 1999;67(4):227-37. ISSN 0038-092X. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00075-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00075-X).
54. Kalogirou SA. Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid PV–thermal solar system for cyprus. *Renewable Energy*. 2001;23(2):247-60. ISSN 0960-1481. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00176-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00176-2).
55. Sinha S, Chandel SS. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;32(4):192-205. ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.035>.