Metodología para el dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos para la electrificación de comunidades rurales situadas en el Occidente de México utilizando herramientas computacionales de optimización

Methodology for the optimal sizing of hybrid systems for the electrification of rural communities located in western Mexico using computational optimization tools

CARRILLO-GÓMEZ, Iván†*, CORONADO-MENDOZA, Alberto y GONZÁLEZ-GABRIEL, Luis Fernando

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Tonalá, División de Ingenierías e Innovación Tecnológica, Departamento de Agua y la Energía, Av. Nuevo Periférico 555 Ejido San José Tatepozco, Tonalá Jalisco, México, C.P. 45425

ID 1^{er} Autor: Iván, Carrillo-Gómez / ORC ID: 0000-0002-1421-4494, CVU CONACYT ID: 824680

ID 1^{er} Coautor: Alberto, Coronado-Mendoza / ORC ID: 0000-0002-6283-4911, CVU CONACYT ID: 98169

ID 2^{do} Coautor: Luis Fernando, González-Gabriel / ORC ID: 0000-0001-9676-6091, CVU CONACYT ID: 556347

DOI: 10.35429/JEE.2019.10.3.1.7

Recibido: 30 de Abril, 2019; Aceptado 30 de Septiembre, 2019

Resumen

Este artículo muestra la importancia que han adquirido los software especializados para el diseño de sistemas energéticos que operan bajo un esquema fuera de la red eléctrica e incorporan Energía Renovables. La relevancia de este trabajo se cierne en el entendido que uno de los objetivos de los gobiernos actuales es mejorar la calidad de vida de las personas y su índice de marginalidad, mediante el acceso al servicio eléctrico. Se propone una metodología para el dimensionamiento de un sistema híbrido aislado utilizando HOMER Pro, un software de optimización de sistemas de potencia que facilita la evaluación técnica y económica del sistema. Se partió de la elaboración de un perfil de demanda para una comunidad rural ubicada en el municipio de Mezquitic al Norte del estado de Jalisco a partir de una revisión internacional, que permita mejorar su índice de desarrollo humano; y la selección de los diferentes componentes de generación y almacenamiento de energía que integran al sistema. El resultado de las simulaciones nos permite construir una tabla de resultados, que facilita la selección de equipos debido a que permite observar las diferentes combinaciones de las variables técnicas, económicas y meteorológicas con mayor viabilidad económica.

Perfil de demanda, Dimensionamiento óptimo, Electrificación rural

Abstract

This paper shows the importance acquired by specialized software for the design of energy systems that operate under a scheme outside the electricity grid and incorporate Renewable Energy. The relevance of this work is based on the understanding that one of the objectives of current governments is to improve the quality of life of people and their marginality index, through access to electricity service. A methodology is proposed for the sizing of an isolated hybrid system using HOMER Pro, a software of optimization of power systems that facilitates the technical and economic evaluation of the system. It started with the elaboration of a demand profile for a rural community located in the municipality of Mezquitic in the North of the state of Jalisco based on an international review, which allows to improve its Human Development Index; and the selection of the different energy generation and storage components that make up the system. The result of the simulations allows us to build a table of results, which facilitates the selection of equipment because it allows to observe the different combinations of technical, economic and meteorological variables and economically viable.

Load profile, Optimal sizing, Rural electrification

Citación: CARRILLO-GÓMEZ, Iván, CORONADO-MENDOZA, Alberto y GONZÁLEZ-GABRIEL, Luis Fernando. Metodología para el dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos para la electrificación de comunidades rurales situadas en el Occidente de México utilizando herramientas computacionales de optimización. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2019. 3-10: 1-7

* Correspondencia del Autor (cagi1993@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La energía es uno de los principales elementos que ha interactuado con el ser humano a lo largo de su evolución, favoreciéndole en su desarrollo. Realmente la energía hoy en día es indispensable para casi todas las actividades que dan impulso a la economía de un país. Lo anterior se comprueba si analizamos a aquellos países industrializados que cuentan con grandes economías, los cuales necesitan de grandes cantidades de energía para sostener un equilibrio en su funcionamiento y tener rápido crecimiento económico, por otra parte, para que los países de desarrollo intermedio logren un mayor crecimiento necesitan incrementar sus consumos de energía (Pastén, 2012).

La electrificación de las comunidades rurales en México y en el mundo había sido un papel no prioritario para los gobiernos de las naciones. Según datos del Banco Mundial en 2016 solo el 77.4% de la población a nivel mundial en el sector rural tenía acceso a la electricidad; en el caso de México desde comienzos del siglo XXI el acceso a la electricidad alcanzó el 96.6%, sin embargo 3.5 millones de personas aún no contaban con acceso a dicho servicio, de las cuales el 60% pertenecían a comunidades indígenas con carencia de servicios e infraestructura (Banco Mundial, 2017).

La implementación de sistemas aislados de generación distribuida con energías renovables ha demostrado ser una opción viable para el suministro de energía eléctrica en este tipo de escenarios. La arquitectura de un sistema híbrido se basa en la combinación de múltiples sistemas de generación de energía en una sola instalación (Ávila, Alesanco & Veliz, 2011). HOMER es el estándar global para el diseño de sistemas de generación distribuida y micro-redes en todos los sectores.

Este software permite evaluar económica y ambientalmente sistemas híbridos de generación de energía eléctrica, mostrando la configuración óptima en cuanto a costos de un conjunto de alternativas (Casarotto, Romano & Collihuin, 2011).

Este trabajo muestra la importancia que han adquirido los software especializados para la planificación de sistemas energéticos cuya naturaleza se enfoca en la implementación de los mismos en escenarios fuera de red, cuyo principal objetivo es la generación de polos de desarrollo que aminoren las brechas de pobreza de las comunidades rurales en el Occidente de México.

La importancia del consumo de energía puede apreciarse de una forma sencilla si lo relacionamos con el índice de desarrollo humano (IDH), éste es un indicador que se encarga de medir el desarrollo humano. El IDH se compone por tres dimensiones básicas de desarrollo: esperanza de vida, nivel de educación y producto interno bruto (PIB) (PNUD, 2016). En la gráfica 1 se representa la relación existente entre el consumo eléctrico por habitante de las distintas economías del mundo. Se puede apreciar que a medida que el consumo per cápita aumenta, el IDH de igual manera presenta un crecimiento, siendo el rango de consumo desde 0 hasta 3,000 kWh/habitante donde el rango del IDH presenta la mayor apertura, que va desde 0.3 hasta 0.8 aproximadamente. Para el caso de México el consumo eléctrico por habitante es de aproximadamente 2,100 kWh con un IDH de 0.76, mientras que en el Municipio de Mezquitic el IDH es de 0.44 (PNUD, 2014).

Gráfica 1 Relación entre el consumo eléctrico y el IDH representado mediante gráfico de dispersión

Fuente: PNUD y Banco Mundial

En la tabla 1 se muestran cuatro diferentes niveles económicos que agrupan a diversos países; conforme el nivel económico de los países aumenta, también aumenta el IDH, el consumo eléctrico y el acceso a la energía eléctrica.

Nivel	IDH	Consumo [kWh/hab.]	eléctrico	Acceso electricidad %
Bajo	0.351–0.555		39–537	4.5–84.9
Medio-Bajo	0.466–0.768		144–3,419	27.9–100
Medio-Alto	0.637–0.826		271–6,603	49.6–100
Alto	0.779–0.948		2,202–19,592	96.4–100

Tabla 1 Rango de valores de algunos indicadores energéticos e IDH por nivel de ingreso económico.
Fuente: Elaboración Propia

Perfil de carga

Para dimensionar un sistema híbrido es necesario conocer el tamaño y tipo de carga que debe satisfacerse, para ello se elaborará una propuesta de un perfil de carga para una comunidad rural ubicada en el municipio de Mezquitic, al norte del estado de Jalisco. Es importante conocer la zona donde se llevará a cabo el dimensionamiento del sistema híbrido (geografía, clima, características sociales, económicas y culturales).

Según INEGI los hogares en este escenario están compuestos en promedio por 4.82 personas; las viviendas están compuestas por 3.34 cuartos en promedio. El 84.8 % de la población en este tipo de escenarios se encuentran en situación de pobreza multidimensional, además de tener un alto nivel de marginación social. Nuestro caso de estudio se centra en San Andrés de Cohamiata una comunidad rural ubicada en el municipio de Mézquitic, en el estado de Jalisco, México. (IIEG, 2017).

La carga eléctrica estimada se basa en una cantidad porcentual del total nacional calculada a partir de un análisis de carga por usuario. La información recolectada para definir el perfil de carga empleado en la simulación considera los siguientes puntos: cantidad de usuarios, número de viviendas, viviendas electrificadas, ocupantes por vivienda, ventas registradas de energía eléctrica y disponibilidad de aparatos eléctricos. Crear una carga sintética desde un perfil es una forma rápida de generar una carga que puede ser relativamente realista. HOMER tiene cuatro tipos de perfil de carga definidos los cuales son: perfil de carga residencial, comercial, industrial y comunidad (Homer Energy, 2016).

Estos perfiles se encargan de dar una distribución de la carga escalar promedio en el transcurso de un día, con un comportamiento parecido al de una comunidad rural. La mayor demanda se efectúa después de las 6:00 pm.

Para este estudio se empleó un perfil de carga tipo comunidad en corriente alterna sin variaciones anuales cíclicas. En la tabla 2 se observa la carga escalar promedio anual y otros parámetros que fueron considerados en el diseño del sistema.

Promedio (kWh/d)	1,100
Promedio (kW)	45.83
Pico (kW)	136.03
Factor de carga	0.34

Tabla 2 Datos escalados de la carga eléctrica considerada en la simulación.
Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, se consideró una carga térmica promedio de 165.9 kWh/d y una potencia promedio de 6.89 kW, una carga pico de 24.57 kW y un factor de carga de 0.24. HOMER simula el funcionamiento de un sistema mediante el balanceo de energía para cada hora del año, comparando: la demanda de energía eléctrica y térmica con las fuentes de generación que puedan abastecer la carga en el mismo intervalo (Rodríguez et al., 2011). La gráfica 2 muestra la distribución de la carga promedio diaria durante las 24 horas del día.

Gráfica 2 Perfil de carga por día.
Fuente: Elaboración Propia

Potencial energético de la zona

Es importante conocer la disponibilidad de recursos energéticos que hay en la zona donde será evaluado el sistema. En HOMER un recurso es cualquier cosa que proviene del exterior del sistema y que es utilizado por un componente para generar energía eléctrica o térmica.

Una de las ventajas de utilizar HOMER es que, cuando introducimos la ubicación del proyecto el software automáticamente descarga de la base de datos de la NASA la información referente a la disponibilidad de recursos.

La ubicación geográfica de la comunidad San Andrés de Cohamiata, fue introducida al sistema con las coordenadas: 22°11.4' N, 104°14.6' O. La figura 3 muestra una vista satelital de la zona a evaluar.

Figura 1 Vista Satelital de la comunidad San Andrés de Cohamiata en el municipio de Mezquitic.
Fuente: Google Maps

Para las coordenadas seleccionadas el software descargó de la base de datos de la NASA la distribución anual de irradiación sobre la superficie horizontal. El promedio anual es de 5.87 kWh/m²/día. La gráfica 3 muestra la radiación solar global promedio en la superficie horizontal, expresada en kWh/m², para cada mes del año.

Gráfica 3 Irradiación Global Horizontal mensual promedio
Fuente: Elaboración Propia

HOMER utiliza la temperatura ambiente para calcular la temperatura de la celda fotovoltaica y al modelar un componente de turbina eólica. Para nuestro lugar de estudio la temperatura promedio anual es de 19.13 °C.

El recurso eólico es demasiado escaso en San Andrés de Cohamiata con un promedio anual de 3.74 m/s, por tal motivo, la idea del uso de aerogeneradores fue descartada. La gráfica 4 muestra la velocidad promedio del viento, expresada en m/s, para cada mes del año.

Gráfica 4 Velocidad promedio del viento expresada en metros por segundo.
Fuente: Elaboración Propia

Selección de componentes y características económicas

El sistema encargado de generar la energía está basado en una arquitectura que contempla el aprovechamiento de energía fotovoltaica a través de paneles fotovoltaicos debido a la alta disponibilidad de recurso solar en esta área; así como el uso de generadores diésel y generadores de gas lp, debido a que los paneles fotovoltaicos no generan energía las 24 horas del día y es necesario considerar fuentes de generación de respaldo. También se considera un sistema de almacenamiento de energía (baterías), el cual además de almacenar la energía eléctrica contribuye con la absorción de las fluctuaciones de la demanda de energía (Werner de Dios & Errasti, 2013).

Para la simulación se tomaron en cuenta diferentes componentes del mismo tipo, pero con fabricante, capacidad y características diferentes. Los componentes probados se presentan en la tabla 3, señalando la capacidad y costo del equipo.

Componente	Detalles	Costo US\$
Generador Diésel	48 kW	16,500.00
Generador Gas LP	22 kW	9,000.00
PV 1	345 W	255.00
PV 2	325 W	275.00
Batería Estacionaria	1.92 kWh	2,520.00
Batería Ciclo Profundo 1	3.12 kWh	390.00
Batería Ciclo profundo 2	1.68 kWh	310.00
Inversor Monofásico	8.2 kW	2,400.00
Boiler Básico de Diésel	32 kW	3,780.00
Calentador eléctrico de Agua	3.6 kW	425.00

Tabla 3 Componentes considerados para la optimización.
Fuente: Elaboración Propia

Además del costo inicial del equipo es necesario considerar los costos de reemplazo, y de operación y mantenimiento del mismo. Para los generadores los costos de reemplazo considerados son del 80 % del costo inicial; en el caso de los paneles fotovoltaicos es del 83 %; para las baterías son de hasta el 89 %.

La tasa de descuento nominal y la tasa de inflación esperada que se contemplaron para la optimización del sistema fueron 8 % y 6 % respectivamente.

La optimización de un sistema híbrido consiste en encontrar la mejor combinación y tamaño de los componentes que cubran una demanda de energía de manera confiable a un bajo costo y mayor eficiencia, partiendo de una demanda eléctrica definida por una ubicación concreta; una estimación de recursos, costos de los componentes, y costos de operación y mantenimiento (Roberts, Prado & Thibaud, 2015).

El esquema del sistema híbrido permite visualizar los componentes y cargas que se encuentran en el sistema. El esquema generado por HOMER para nuestra simulación se muestra en la figura 2.

Figura 2 Esquema ilustrativo considerado en la optimización
Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Al finalizar los cálculos de optimización HOMER simuló 135,991 soluciones para nuestro sistema de las cuales 89,964 son factibles, 33,357 no son factibles debido a restricciones por su escasa capacidad. También se omitieron 21,462 soluciones por diversos motivos de incongruencia en el sistema.

Como resultado de la simulación HOMER optimizó la arquitectura del sistema, donde se seleccionaron las diez mejores variantes del sistema, las cuales se muestran en la tabla 4. Donde PV1 y PV2 son los paneles fotovoltaicos; Gen D se refiere al Generador Diésel; BCP1 y BCP2 a las Baterías de Ciclo Profundo 1 y Baterías de Ciclo Profundo 2 respectivamente; CCT al Control de Carga Térmica; e INV al Inversor del Sistema. Las mejores combinaciones arrojadas por HOMER no incluyen el Generador de Gas LP, ni la Batería Estacionaria debido a su alto costo de inversión inicial.

Conf. #	PV2 kW	PV1 kW	Gen D kW	BCP1 Pza	BCP2 Pza	CCT kW	INV kW
1	0	321.13	0	0	615	0	108.91
2	0	321.13	0	0	615	25	108.91
3	309.91	0	0	0	672	0	106.20
4	309.91	0	0	0	672	25	106.20
5	0	289.75	48	0	586	25	107.31
6	0	366.15	0	519	0	0	108.39
7	272.02	0	48	0	596	25	108.82
8	0	366.15	0	519	0	25	108.39
9	327.49	0	0	575	0	0	111.27
10	327.49	0	0	575	0	25	111.27

Tabla 4 Arquitectura de las configuraciones óptimas del sistema

Fuente: Elaboración Propia

La clasificación de los resultados de la simulación está determinada por el CPN (Costo Presente Neto). El CPN es el valor presente de todos los costos en los que incurre el sistema durante su vida útil, menos el valor presente de todos los ingresos que gana durante su vida útil. El CNE es el Costo Nivelado de Energía es el costo promedio por kWh de energía útil producida. El CO se refiere a los Costos de Operación durante todo el año y el CI al Capital Inicial, es decir, el costo de inversión inicial de los componentes del sistema. Estos valores se muestran en la tabla 5.

Conf #	CNE \$	CPN \$	CO \$/año	CI \$
1	0.16369	631,919.10	19,039.44	459,878.30
2	0.16423	633,819.20	18,923.10	462,829.70
3	0.16946	652,681.40	16,716.49	501,630.80
4	0.17000	654,581.50	16,600.14	504,582.20
5	0.17302	681,970.80	26,038.87	446,682.90
6	0.18236	699,831.50	21,587.37	504,767.50
7	0.17826	700,248.80	25,897.83	466,235.40
8	0.18290	701,731.60	21,471.03	507,718.90
9	0.18732	715,022.30	20,041.74	533,924.60
10	0.18787	716,922.40	19,925.40	536,876.00

Tabla 5 Costos de las configuraciones óptimas del sistema.

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados muestran que las configuraciones óptimas del sistema alcanzan un valor de FR (Fracción Renovable) de hasta un 86 %, esto indica el porcentaje de la carga eléctrica que es satisfecha mediante el uso de energías renovables. La Escasez de Capacidad, representada como EC, se refiere al porcentaje del déficit de capacidad, es decir, la carencia presentada entre la capacidad requerida y la cantidad real de la capacidad operativa del sistema. PE y PT representan la Producción de Energía Eléctrica y la Producción de Energía Térmica respectivamente, en un periodo anual.

El Excedente de Electricidad representado por las siglas EE se refiere al excedente de energía eléctrica producida que no puede ser aprovechado para servir a una carga o cargar baterías. Los valores de las diferentes configuraciones resultantes de la simulación se pueden observar en la Tabla 6.

Conf #	FR %	EC %	PE kWh/año	PT kWh/año	EE kWh/año	CO ² kg/año
1	86.56	5.1	612,644	60,330	177,423	16,445
2	86.56	5.1	612,644	60,330	177,423	16,445
3	86.57	5.04	587,276	60,330	151,527	16,445
4	86.57	5.04	587,276	60,330	151,527	16,445
5	82.67	0.84	572,249	60,238	126,881	33,008
6	86.6	4.89	698,548	60,330	248,514	16,445
7	82.02	1.03	537,878	60,219	93,190	35,381
8	86.6	4.89	698,548	60,330	248,514	16,445
9	86.56	5.08	620,599	60,330	171,708	16,445
10	86.56	5.08	620,599	60,330	171,708	16,445

Tabla 6 Características del Sistema.

Fuente: Elaboración Propia

Agradecimiento

Se agradece el apoyo recibido por el Centro Universitario de Tonalá, perteneciente a la Universidad de Guadalajara y a CONACYT a través del Proyecto CB-2015/250777: Análisis de estabilidad de micro-redes aisladas con energías renovables.

Conclusiones

El consumo de energía eléctrica demuestra ser un factor influyente en la calidad de vida de las personas. La relación entre estas dos variables de distintos países del mundo nos proporciona una referencia de que consumo de energía eléctrica hay que considerar para que la calidad de vida de las personas pueda mejorar.

La utilización de las diversas herramientas informáticas para el dimensionamiento de sistemas híbridos y micro-redes permiten el desarrollo de propuestas más sólidas y precisas para el desarrollo de proyectos de electrificación en cualquier parte del mundo mediante Micro-redes con energías renovables. HOMER es un software de gran alcance que permite dimensionar y evaluar de manera rápida y precisa sistemas de generación distribuida permitiendo al usuario ingresar el conjunto de variables que describen los aspectos técnicos y financieros del sistema.

Para nuestro caso de estudio la mejor solución a la arquitectura del sistema híbrido involucra la generación de energía a través de paneles solares y almacenamiento en baterías de ciclo profundo de ácido-plomo, descartando el uso de generadores eléctricos a base de Diésel y Gas LP, haciendo nuestro sistema con menor impacto negativo sobre el medio ambiente.

Referencias

Ávila, D., Alesanco, R. y Veliz, J. (2011). Sistemas híbridos con base en las energías renovables para el suministro de energía a plantas desaladoras. *Ingeniería Mecánica*, 14(1). Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v14n1/im03111.pdf>

Banco Mundial (2017). Comunidades rurales alejadas de la red eléctrica logran acceso a electricidad en México. Recuperado de: <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/11/01/switching-on-remote-communities-through-electricity-access-in-mexico>

Casarotto, C.F., Romano, J.S. y Collihuin C.A. (2011). Evaluación de sistemas híbridos para electrificación de zonas remotas mediante HOMER. Recuperado de: http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen_2011/trabajos/18-037.pdf

Homer Energy. (2016). Homer Pro Version 3.7 User Manual. Recuperado de: <https://www.homerenergy.com/pdf/HOMERHepManual.pdf>

Instituto de Información Estadística y Geográfica (IIEG, 2017). Mezquitic. Diagnóstico del Municipio. Recuperado de: <http://www.ieg.gob.mx/contenido/Municipios/Mezquitic.pdf>

Pastén, C. (2012). Chile, energía y desarrollo. *Obras Y Proyectos*, 11, 28–39. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132012000100003>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2014). Índice de Desarrollo Humano municipal en México: nueva metodología. Recuperado de: <https://www.undp.org/content/dam/mexico/docs/Publicaciones/PublicacionesReduccionPobrez a/InformesDesarrolloHumano/UNDP-MX-PovRed-IDHmunicipalMexico-032014.pdf>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2016). Informe sobre el Desarrollo Humano 2016. Recuperado de: http://hdr.undp.org/sites/default/files/HDR2016_SP_Overview_Web.pdf

Roberts, J., Prado, P. y Thibaud, S. (2015). Proyecto de un sistema híbrido de generación con energías renovables para un establecimiento rural aislado. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/293950988>

Rodríguez, C., Jeandrevin, G., Ybáñez, J., Piumetto, M., Lago, D., Correa, G. y Leiva, E. (2011). Diseño de sistemas energéticos híbridos basados en hidrógeno para una población de la Provincia de Córdoba Argentina. Recuperado de: http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen_2011/trabajos/16-163.pdf

Werner de Dios, A. y Errasti, M. (2013). Diseño por simulación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico para una vaquería en Cuba. *Ingeniería Mecánica*, 16(2). Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/2251/225129325004.pdf>