



Control de Generación de una Micro-Red Eléctrica Conformada por Fuentes Renovables de Energía

B. P. Guzmán-Escoto^a, J. M. Lozano García^a, A. Pizano-Martínez^a, E. A. Zamora-Cárdenas^a,
H. J. Estrada-García^a.

^aUniversidad de Guanajuato, DICIS, Salamanca, Gto., bp.guzmanescoto@ugto.mx,
jm.lozano@ugto.mx, apizano@ugto.mx, ezamora@ugto.mx, hestrada@ugto.mx,

RESUMEN:

Las Micro-redes eléctricas que integran fuentes renovables de energía como medios de generación distribuida, se vislumbran como una excelente opción para dar soporte a una parte de la creciente demanda energética. En México, se ha incrementado el número de instalaciones de micro-redes eléctricas de bajos niveles de potencia, principalmente para consumo residencial, y en menor medida en niveles industriales. Sin embargo, la gran mayoría de estas micro-redes no presentan un esquema de control que les permita optimizar la energía que generan y por lo tanto aumentar el beneficio económico al incluir restricciones impuestas por las diferentes tarifas energéticas de CFE. Para analizar la operación de la micro-red se utilizan modelos detallados de los diferentes elementos que la conforman, implementados en Simulink de Matlab®, y se consideran datos variantes en el tiempo tanto para la demanda de energía, la velocidad del viento y los niveles de radiación solar, para recrear con una buena aproximación la operación completa de la micro-red en un horizonte de tiempo de 24 horas. La micro-red opera en conexión con el sistema eléctrico para abastecer en conjunto la carga demandada.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento en la demanda energética previsto para nuestro país, de acuerdo las prospectivas eléctrica y energética para los próximos años, así como la dependencia que se tiene de fuentes de energía que utilizan petróleo como principal energético, establecen un panorama en el que se vislumbra un incremento en el costo de la energía principalmente para el sector industrial. Por citar un ejemplo, a las empresas cuyas características de demanda son tan elevadas que deben solicitar un servicio en niveles de sub-transmisión, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) les cobra cargos tanto por demanda facturable como por consumo neto de energía, además de que este tipo de tarifas (H-S H-SL H-T H-TL) se ajustan mensualmente de acuerdo a consideraciones que incluyen las variaciones en los precios de los combustibles, así como la variación de un índice de precios productor de siete divisiones económicas [1]. Para estos casos en particular, los sistemas de generación propios basados en energías renovables son una muy buena opción para reducir los costos por consumo energético, ya que además de que pueden resultar sistemas auto-sustentables desde el punto de vista económico, pueden aprovecharse los apoyos gubernamentales como el establecido en el artículo 34, fracción XIII, de la Ley del Impuesto sobre la Renta que establece que se pueden deducir hasta el 100% de activos fijos para maquinaria y equipo para la generación de energía proveniente de fuentes renovables o de sistemas de cogeneración de electricidad eficiente [2]. Aunado a lo anterior, otro aspecto de gran importancia asociado a este tipo de sistemas basados en energías renovables está el impacto ambiental benéfico.



Por otro lado, sobre este tema se han reportado una gran cantidad de trabajos, en los cuales se analiza la factibilidad de micro-redes basadas en energías renovables, pero por lo general se trata de instalaciones industriales de baja potencia [3], o aplicaciones residenciales [4]. Por lo general, en este tipo de análisis, se presentan micro-redes eléctricas propuestas en base a valores promedios de generación, suponiendo constantes todas las condiciones que afectan la operatividad del sistema durante todo el periodo de vida útil. Asimismo, no se considera una estrategia de control que permita aprovechar al máximo la energía generada por la micro-red.

El presente trabajo exhibe la operación de una micro-red conformada por fuentes de energía renovables, tratando de recrear de forma precisa la operación de la misma mediante la utilización de modelos detallados de los elementos que la conforman. De igual forma, se emplean mediciones reales para estimar las condiciones ambientales para cada día en un horizonte de tiempo de veinte años. Como caso de estudio se analiza el consumo energético de una empresa ubicada en la ciudad de Salamanca, Gto., la cual opera en la tarifa eléctrica H-SL [5]. La micro-red eléctrica empleada para reducir el consumo eléctrico esta dimensionada para cubrir el consumo energético diario de la empresa en el horario punta, y el objetivo del control operativo de la micro-red se enfoca en determinar la operación óptima que permita obtener el mayor beneficio económico al término del periodo de vida útil de la micro-red.

2. OPERACIÓN DEL CONTROL DE LA MICRO-RED

Inicialmente la micro-red propuesta para el presente estudio contaba con dos fuentes de generación de energía, paneles fotovoltaicos y aerogeneradores. La configuración del sistema para las simulaciones iniciales se ilustra de forma general en la Figura 1. En esta figura, además se exhiben los modelos implementados en Simulink para los elementos principales, señalando que para el caso de la batería se utilizó el modelo propio del software.

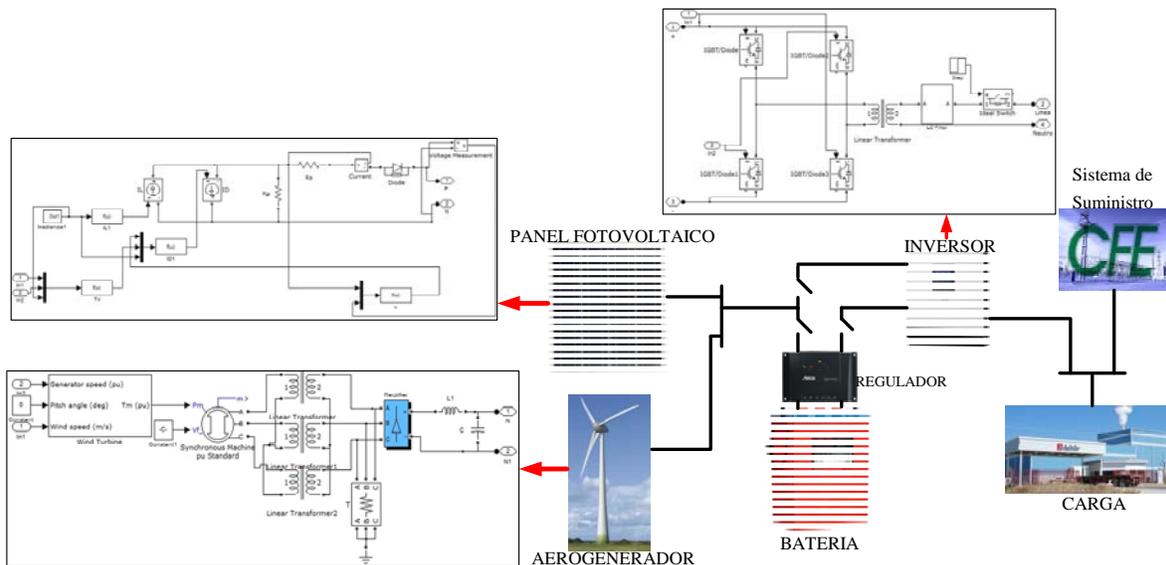


Figura 1. Sistema general micro-red – sistema de suministro – carga, para simulaciones de control de carga.

La operación del sistema mostrado en la Figura 1 se puede resumir de la siguiente manera:

- Las fuentes de energía de la micro-red generarán de acuerdo a las curvas tanto de radiación solar como de velocidad de viento, por lo cual su nivel de generación no será constante.



- La energía generada podrá ser almacenada en un sistema de almacenamiento basado en baterías, cuyo nivel de carga será controlado mediante un regulador. La energía almacenada durante las primeras horas de generación será utilizada para alimentar parte de la carga en horario considerado para la energía punta de acuerdo a la tarifa correspondiente. De igual forma, cuando las baterías estén totalmente cargadas, el excedente de energía producida se inyectará directamente a la carga en tiempo real.

El control de la micro-red es muy sencillo y su función principal es la de controlar el flujo de energía entre cada uno de los elementos (paneles fotovoltaico, aerogenerador, batería y carga) a lo largo del día, a fin de obtener el mayor beneficio económico. En la Figura 2 se presentan algunas de las señales obtenidas por el sistema simulado, simplemente para ilustrar el control operativo de la micro-red.

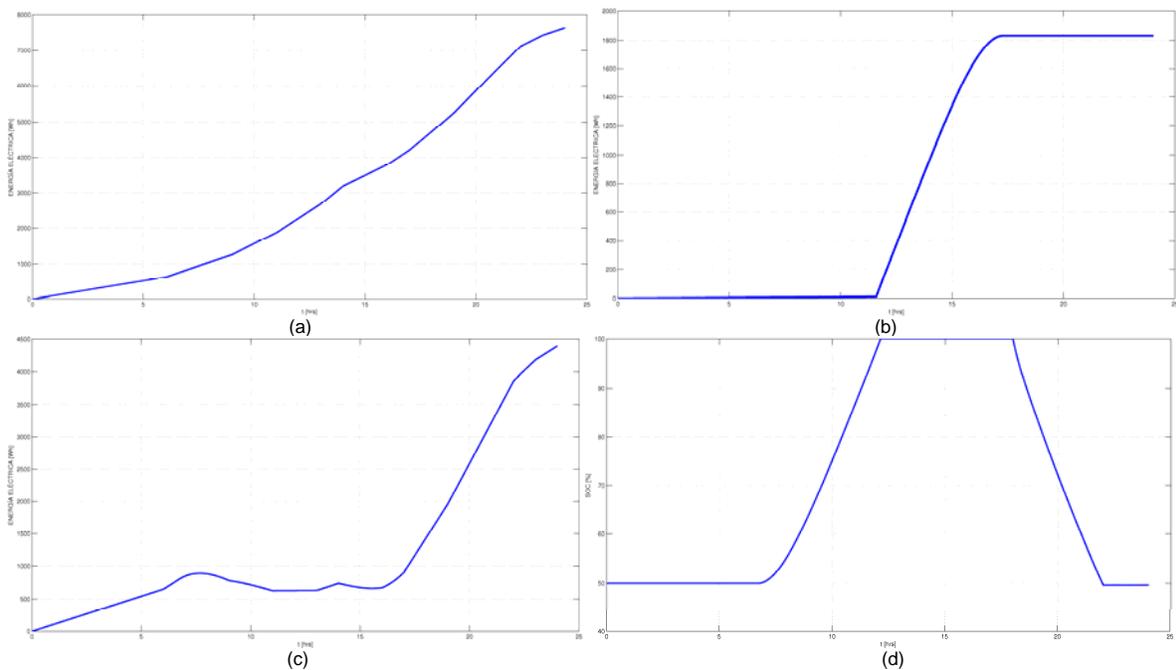


Figura 2. a) Consumo energético en la carga. b) Suministro de la micro-red a la carga. c) Suministro del sistema eléctrico principal. d) Nivel de carga de la batería

En estas figuras se aprecia cómo es posible controlar el flujo de la energía generada por la micro-red. En un inicio, la energía generada por la micro-red (a partir de las 6 hrs aproximadamente) es destinada para dos objetivos diferentes, una porcentaje de la energía se envía hacia la carga, mientras que el resto se utiliza para cargar los elementos de almacenamiento de energía. En la Figura 2d, se distingue como el nivel de carga de la batería comienza a aumentar hasta llegar a su máximo después de 6 horas. En la Figura 2b se observa cómo, una vez que las baterías están cargadas completamente, la sección de la micro-red encargada de cargar las baterías, también comienza a aportar energía a la carga. Finalmente, la micro-red deja de generar energía en un tiempo aproximado t igual a 17.5 hrs, en el periodo comprendido entre las 18 hrs y las 22 hrs. Se utiliza la energía almacenada en las baterías, para suministrar la demanda en la carga junto con el sistema principal.



3. ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO

A. Determinación del Flujo de Energía Óptimo

Una vez que se ha analizado y verificado el control de energía en la micro-red, se establecen las condiciones del caso de estudio. El objetivo es determinar la operación óptima para la micro-red que suministrará energía a la empresa Daltile México S. de R.L. de C.V. ubicada en la ciudad de Salamanca, Gto. Al realizar las simulaciones de la sección anterior, la aportación energética del aerogenerador es mínima para las condiciones de velocidad de viento existentes en la ciudad, resultando en un sistema que no sería factible desde el punto de vista económico como se reporta en [6]. Debido a esto, la micro-red considerada para el caso de estudio estará conformada solamente por paneles fotovoltaicos.

La micro-red debe suministrar una cantidad de energía equivalente al valor de consumo diario de la empresa en el horario punta de la tarifa HS-L (periodo de lunes a viernes), esto es 10,902.68 kWh. El diseño para la micro-red sin sistema de almacenamiento se presenta en [7].

El dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía es la parte clave para lograr la operación óptima de la micro-red, debido al elevado costo de sus elementos; la capacidad de éste sistema determinará los beneficios económicos totales a obtener y por ende la factibilidad del proyecto. Para tener una idea de la capacidad óptima que debe tener el sistema de almacenamiento, se tomará como base el consumo energético y el pago por éste rubro, durante el mes de enero de 2015, Tabla 1.

Tabla 1. Consumo Energético de la empresa Daltile México sin considerar la operación de la micro-red fotovoltaica.

Concepto	Demanda	Concepto	Importe \$
Energía base kWh mensual	674,138	Energía	1,826,622.54
Energía Intermedia kWh mensual	820,513	Demanda Facturable	627,648.00
Energía Punta kWh mensual	267,116	Subtotal	2,454,270.54
Demanda Facturable		IVA 16%	392,683.28
		Total Mensual	\$2,846,953.82

Considerando la potencia de generación diaria de la micro-red (10,902.18 kWh) como el 100%, el sistema de almacenamiento se dimensionará con un nivel que cubra un porcentaje de esta cantidad de energía. De esta manera, el porcentaje de energía almacenado se utilizará para contribuir al suministro de la demanda en el horario punta y el resto se utilizará en los horarios base e intermedio. Para cada porcentaje de almacenamiento considerado, se tendrá una disminución específica en el consumo de energía dentro de cada categoría (punta, intermedia y base). Lo anterior tendrá repercusión en las cantidades a pagar por concepto de consumo de energía total y demanda facturable, como se observa en la tabla 2.

A partir de los datos expuestos en la Tabla 2, se puede concluir que almacenando el 50% de la energía generada durante el día por la micro-red, y empleando esta energía en el horario de energía punta, se obtendría la mayor ganancia al final del periodo de vida útil de la micro-red. Los días domingo al no existir horario para la energía punta, la energía almacenada se utilizará en el horario de energía intermedia.

B. Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento de Energía

Con base en el porcentaje obtenido en la sección anterior, se procede a dimensionar el sistema de almacenamiento. El sistema estará integrado por dos elementos principales, el regulador de carga



y la batería. Los reguladores a utilizar tienen una capacidad de 2400 Wp, por lo que se necesitaría un regulador por cada ocho paneles de 300 Wp, dando un total de 713 reguladores. Las baterías consideradas para la aplicación, son baterías Rolls Serie 4000 S530 de 6V y 530 Ah de capacidad; de esta manera, la capacidad de almacenamiento por unidad es de 3.18 kWh. La vida útil de este componente es de 1280 ciclos de descarga al 50%, esto es, cada batería puede entregar una cantidad de energía igual a 1.5 kWh por día. El número de baterías requeridas es de 3429. Sin embargo, para una operación de 5 ciclos por semana, estas baterías durarían 256 semanas, por lo que para cubrir los 20 años se necesitaría cuatro veces este número de baterías, dando un total de 27428. En la Tabla 3 se resume la información concerniente a los componentes de la micro-red, junto con el costo total de la inversión.

Tabla 2. Pago de consumo energético considerando una micro-red con diferentes porcentajes de almacenamiento

PORCENTAJE DE ALMACENAMIENTO										
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Consumo mensual de kWh Punta	237678	208241	178804	149367	119929	95943	71958	47972	23986	0
Consumo mensual de kWh intermedios	837383	862459	887536	912612	937688	957313	976938	996562	1016187	1035812
Consumo mensual de kWh base	680595	684956	689317	693678	698039	702400	706761	711122	715483	719845
Pago por energía	1533605	1514090	1494575	1475061	1455546	1439571	1423597	1407622	1391648	1375673
Pago por demanda facturable	557506	489161	436783	384405	332026	289256	246485	203714	160944	121703
Subtotal	2091111	2003252	1931359	1859466	1787573	1728828	1670082	1611337	1552592	1497377
IVA 16%	334577	320520	309017	297514	286011	276612	267213	257814	248414	239580
Total Mensual	2425689	2323772	2240376	2156980	2073585	2005440	1937296	1869151	1801007	1736957
Total 20 años	582165485	557705407	537690420	517675432	497660445	481305758	464951071	448596384	432241697	416869782
Total 20 años (con inversión)	642945659	636246073	633991579	631737084	629482589	630888395	632294200	633700006	635105812	637494389

Tabla 3. Componentes de la micro-red fotovoltaica con sistema de almacenamiento de energía

Componente	Características	Costo unitario	Núm. Componentes	Costo total (MXN)
Panales fotovoltaicos ERDM320M6	300Wp, eficiencia de %16.5	\$4,116.80	5704	\$23,482,227.20
Inversor Growatt 5000	Capacidad 5000W	\$27,098.18	300	\$8,129,454.00
Estructuras		\$2000.00	5704	\$11,408,000.00
Regulador Steca Tarom 45454	Capacidad 2400 Wp	\$4,473.45	366	\$1,637,282.70
Batería Rolls S530	6V, 530 Ah C100	\$6,355.00	13,716	\$87,165,180.00
Inversión Total				\$131,822,143.90

4. RESULTADOS

Al igual que en el caso presentado en [7] para una micro-red sin sistema de almacenamiento, a fin de determinar el ahorro económico que se tendría en el periodo de vida útil de la micro-red, para el presente caso de estudio, es necesario calcular la energía generada por la micro-red durante cada día de los veinte años contemplados.

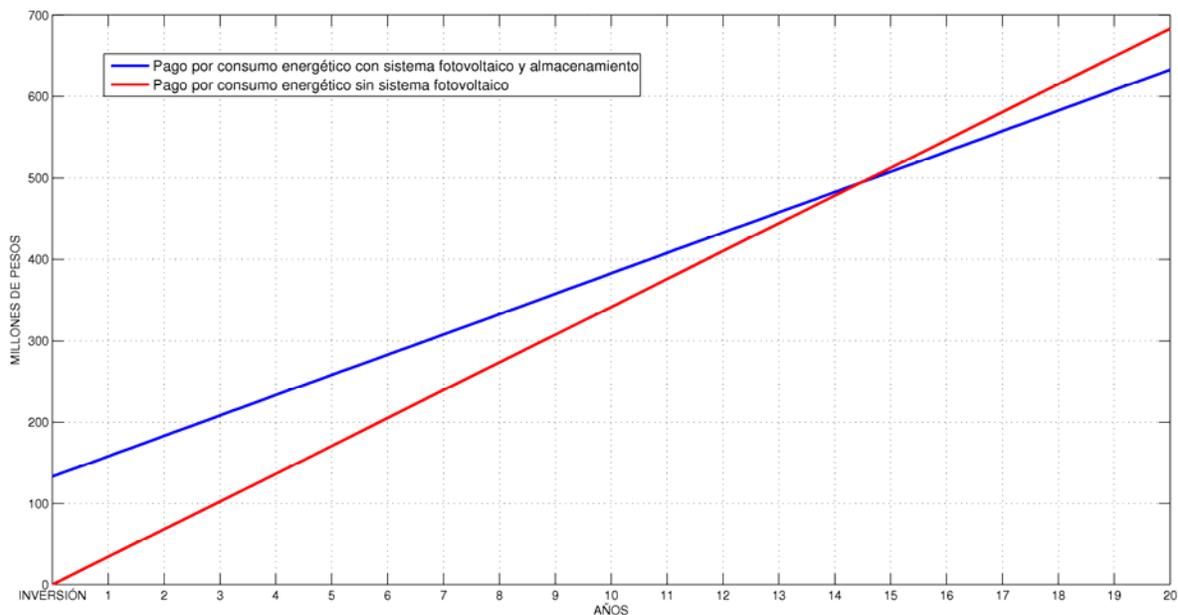


En este caso, durante cada día, se determina la cantidad total de energía generada, una parte de esta energía es almacena y utilizada en el horario donde la tarifa es más elevada, y el resto se emplea en el horario correspondiente al momento en el que se genera. Los datos equivalentes para el mes de enero de 2015, con la micro-red y el sistema de almacenamiento en operación, se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Consumo Energético de la empresa Daltile México considerando la operación de la micro-red fotovoltaica con un sistema de almacenamiento del 50%.

Concepto	Demanda	Concepto	Importe \$
Energía base kWh mensual	703,184	Energía	1,487,811.88
Energía Intermedia kWh mensual	972,415	Demanda Facturable	335,988.82
Energía Punta kWh mensual	119,929	Subtotal	1,823,800.70
Demanda Facturable		IVA 16%	291,808.11
		Total Mensual	\$2,115,608.82

Comparando los pagos mensuales de las Tablas 1 y 4, con la micro-red se tiene un ahorro de \$731,345.00 pesos. Haciendo un análisis similar para cada mes, se determinan los pagos que se tendrían que hacer cada mes. Si a estos valores obtenidos se les adiciona la inversión inicial, se puede determinar gráficamente el tiempo de recuperación, como se observa en la Figura 3.



En la Figura 3, el punto donde se igualan las curvas indica el tiempo en el que se recuperaría la inversión, para este caso de estudio el resultado es de aproximadamente 14.5 años. La ganancia total que se tendría al final del periodo de vida útil de la micro-red sería de \$50,476,356.73.



4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el proyecto es económicamente sustentable, ya que se recupera la inversión inicial en un tiempo de 14.5 años. El tiempo de recuperación resultante es mayor al obtenido para la misma empresa, pero con una micro-red operando sin control ni sistema de almacenamiento; sin embargo, a pesar de ésta diferencia en el tiempo de recuperación, el ahorro neto que se obtiene al fin de la vida útil de la micro-red, es un poco mayor en el presente caso. La inversión inicial requerida por este tipo de micro-redes es una cantidad considerable, y esto seguirá manteniéndose como el principal obstáculo a la hora de decidirse por alguna topología en particular; no obstante, estudios como el realizado en el presente trabajo evidencian las aplicaciones novedosas que pueden surgir a partir de este tipo de configuraciones, como el emplear la micro-red con su almacenamiento de energía como un dispositivo FACTS compensador de disturbios, o la implementación de esquemas de optimización en tiempo real que puedan modificar el flujo de energía de la micro-red en horizontes de tiempo cortos que logren una mejor operación y un mayor beneficio económico. Estos últimos puntos refuerzan la importancia de los resultados obtenidos, además de que justifican la utilización de modelos detallados para sistemas y estudios en donde hasta la fecha se determinaban a partir de valores promedios.

BIBLIOGRAFÍA

1. Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027. Secretaría de Energía. http://sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2013/Prospectiva_del_Sector_Electrico_2013-2027.pdf (Última consulta 13 de abril de 2015).
2. Ley del Impuesto sobre la Renta. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Artículo 34, Fracción XIII. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LISR.pdf> (Última consulta 13 de abril de 2015).
3. D. Banda, R. Peña, G. Gutierrez, E. Juarez, N. Visairo and C. Nunez, "Feasibility assessment of the installation of a photovoltaic system as a battery charging center in a mexican mining company", in Proceedings of the IEEE Centro Occidente International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC'14, México, 2014.
4. J. Martínez-Patiño, M. A. Hernández-Figueroa, F. Ireta-Moreno, A. Rodríguez-Domínguez y P. Sánchez-Razo, "Análisis técnico económico para el uso de energía fotovoltaica para usuarios de alto consumo en el sector residencial", en Memorias de la Reunión Internacional de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial RVP-AI/2013, México, 2013.
5. Comisión Federal de Electricidad. http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=HSL&Anio=2015&mes=4 (Última consulta 15 de abril de 2015).
6. M. A. Hernández-Figueroa, M. A. Gómez Martínez, J. M. Lozano-García, F. Ireta-Moreno, "Estudio de factibilidad de generación eléctrica en el estado de Guanajuato mediante fuentes alternas de energía", en Memorias del XXXIII Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica, Electro 2011, México, 2011.
7. B. P. Guzmán-Escoto, M. A. Montecillo-Torres, J. M. Patiño, M. A. Gómez Martínez, O. Rodríguez-Villalón, L. C. Razo-Vargas, "Análisis de factibilidad para la instalación de una micro-red eléctrica de nivel industrial en Salamanca, Guanajuato", en Memorias del Congreso XII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, México, 2015.