SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS ENERGETICAS PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN COMUNIDADES RURALES. CASO DE ESTUDIO: TEPISUAC, MEXICO

Daniel Martínez González

Luis Héctor Quintero Hernández

Universidad de Guadalajara

Abstract

The selection of energy alternatives is a complex process; it is subordinated to the application context and the interests involved in. Nowadays, there are several ways to undertake this analysis, although almost all of them are based on a simple rule: the system has to be cost effective. This term has received the attention of many policy makers all over the world, and the necessity of incorporating multiple criteria for the optimal allocation of energy resources is becoming more accepted. In this paper, some possible ways to do this analysis are discussed and a real case is analyzed, where we consider the following energy options: solar thermal energy for water heating, biogas and wood for cooking, and solar photovoltaic competes with grid-electricity for water pumping, lighting and electrical appliances. The analysis incorporates fuzzy logic to reduce the subjectivity of the selection process. In addition, this paper presents the measurement of the poverty in the rural community selected before and after the application of the methodology, with results that show a reduction in the poverty.

***Keywords**:* Rural communities; energy alternatives; sustainable development; multicriteria decision; fuzzy logic

Resumen

La selección de alternativas de energía es un proceso complejo, que está subordinado al contexto de aplicación y los intereses en juego. En la actualidad hay varias maneras de llevar a cabo este análisis, aunque casi todos ellos se basan en una regla simple: el sistema tiene que ser rentable. Esto ha llamado la atención de muchos decisores en el mundo, y la necesidad de incorporar varios criterios para la selección adecuada de recursos energéticos es cada vez más aceptada. En este trabajo se discuten algunas formas de hacer este análisis tomando un caso real, en el que se consideraron como opciones adecuadas los siguientes recursos: energía solar térmica para calentar el agua, biogás y leña para cocinar y la energía solar fotovoltaica que compite con la red eléctrica para el bombeo de agua, iluminación y electrodomésticos. El análisis incorpora la lógica difusa para reducir la subjetividad del proceso de selección. Además, en este trabajo se presenta la medición de la pobreza en la comunidad rural en estudio antes y después de la aplicación de la metodología, con resultados que muestran una reducción de la pobreza.

***Palabras clave:** Comunidades rurales; alternativas energéticas; desarrollo sostenible; decisión multicriterio; lógica difusa*

1. Introducción

La marginación y la pobreza son escenarios recurrentes en México, más aún en localidades rurales en las que el acceso a servicios básicos les limita la vida cotidiana y la capacidad de desarrollar actividades económicas que mejoren su situación actual. Una de estas limitaciones es el acceso a la energía eléctrica con la cual satisfacer necesidades domésticas básicas de iluminación, refrigeración, entre otras, así como desarrollar actividades productivas. El consumo per cápita rural en México es apenas la tercera parte del correspondiente en el medio urbano y se estima que el 66% de la energía rural proviene de la leña, mientras que de la electricidad se obtiene sólo el 3% (Martínez, 2010).

El aumento en la capacidad económica de las comunidades rurales será consecuencia del aumento de las actividades productivas, mismas que requieren de un acrecentamiento en el consumo de recursos energéticos no sólo en cantidad, también en calidad. Los habitantes de estas entidades, en su mayoría campesinos, cuentan con menos instalaciones y equipos eléctricos, por lo que requieren menos electricidad y su ubicación geográfica les provee de fuentes renovables de energía.

Para los gobiernos en turno, el remedio a la falta de electricidad es instalar sistemas fotovoltaicos por casa habitación, desconocidos y sin un estudio previo de factibilidad, y con capacidad para pocos electrodomésticos; además de que estudios precedentes señalan que estos sistemas o la simple extensión de la red eléctrica nacional para cubrir necesidades caseras, no siempre son los más adecuados para comunidades con características socioeconómicas y culturales distintas a las urbanas.

En este trabajo se presenta un modelo que propone no solamente abastecer a una localidad rural con energía, sino evaluar alternativas que incluyan criterios de índole social, económica y ambiental que aseguren que la selección se adecue tanto a las posibilidades económicas de sus habitantes, como a su capacidad de mantener el sistema, sin olvidar el impacto ambiental para lograr el equilibrio entre la tecnología y la vida cotidiana de los campesinos.

El modelo se basa en criterios múltiples con operadores difusos para incorporar y valorar la subjetividad que se presenta en el proceso.

2. Metodología

A partir de las condiciones de Tepisuac y otras localidades rurales donde satisfacer las necesidades eléctricas básicas domésticas no basta para reducir significativamente la pobreza, presentamos un modelo para la generación, distribución y consumo de electricidad capaz de ser sustentado por sus habitantes, con la posibilidad de generar energía para aplicaciones laborales que colaboren en la reducción de la pobreza, y que, en su caso, sirva de referencia para aplicarse en localidades rurales de condiciones similares.

Para elaborar el método partimos de un esbozo de las condiciones socioeconómicas y culturales de la comunidad, para determinar el nivel de impacto de la intervención y por otro lado conocer las carencias que pudieran ser aliviadas al tener acceso al suministro de energía eléctrica. Conociendo las necesidades de la población podemos determinar la cantidad de energía requerida y valorar el potencial de los recursos disponibles en el lugar para satisfacerla, ya sean renovables o convencionales.

Este método propone no solamente abastecer a una localidad rural con energía, sino evaluar alternativas que incluyan criterios de índole social, económica y ambiental, mediante un análisis multicriterio de ponderación lineal y operadores difusos para tener un amplio panorama que asegure que la selección se adecue tanto a las posibilidades económicas de sus habitantes, como a su capacidad de mantener el sistema, sin olvidar el impacto ambiental para lograr equilibrio entre la tecnología y la vida cotidiana de las poblaciones.

3. El caso Tepisuac

Esta localidad rural se localiza en el municipio de Huejuquilla El Alto, Jalisco, en las coordenadas 22°28´28”N y 104°03’14”O; cuenta con 95 habitantes en 19 viviendas.

3.1 Medición de la pobreza

En esta investigación se utilizó el método de las Necesidades Básicas Insatisfechas modificado por Boltvinik (1992), quién propone un proceso para obtener un índice que sí exprese de algún modo la intensidad de la pobreza en la familia y en la localidad, mostrando además la magnitud de las carencias. En este procedimiento, se obtiene un valor para cada necesidad básica en la escala (1,–1) donde 1 representa la condición de total carencia y –1 el de la satisfacción total de la necesidad; en torno del valor 0, la familia estaría en el “umbral de la pobreza” en determinada necesidad. Incluso, este procedimiento permite una agregación de todas las carencias evaluadas de modo de obtener la Intensidad de Necesidades Básicas Insatisfechas (INBI) del hogar y localidad en cuestión. Además, el resultado también expresa la magnitud de la carencia, en función de la “distancia” del INBI respecto al –1, que representa la mejor condición.

Las necesidades básicas que se midieron en Tepisuac fueron las siguientes: disponibilidad de agua, drenaje, electricidad, condiciones de la vivienda, equipo en el hogar, combustible para cocinar, asistencia escolar, nivel educativo, hacinamiento y dependencia económica. A los primeros siete indicadores se les dio desde el principio una escala (1,–1) mientras que los indicadores ocho, nueve y diez fueron normalizados como sigue:

$$P_{ij} = \frac{X_i - X_{ij}}{X_i} \tag{1}$$

Donde:

Pij es la necesidad básica normalizada i en el hogar j.

Xi es la norma mínima para tal necesidad.

Xij es el valor de la necesidad medida en el hogar en cuestión.

Cuando la carencia es totalmente insatisfecha (es decir, si Xij=0), Pij será 1, que en la escala (1,–1) significa falta total. Si tiene valor mayor a cero pero menor a la norma mínima, Pij tomará un valor positivo (en el rango 0, 1) representando un determinado grado de insatisfacción. Cuando Xij es mayor a la norma mínima, el resultado será negativo, representando efectivamente un grado de satisfacción de la necesidad; sin embargo, estos valores negativos no están acotados, por lo que es necesario cambiar el resultado a la escala (1,–1), de acuerdo a:

(2)

$$P'_{ij} = \frac{P_{ij}}{max|P_{ij}|}$$

Para Pij < 0

Donde:

P´ij es el indicador re–escalado de la necesidad i en el hogar j.

Entonces es posible obtener el índice de pobreza agregando el indicador de cada carencia. Para esto se utiliza la siguiente expresión:

(3)

$$IP_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_{ij}$$

Donde:

IPj es el índice de pobreza del hogar j.

Pij es la necesidad i en el hogar j pero siempre en el rango [1,-1].

n es la cantidad de necesidades evaluadas.

Con este mismo procedimiento también se obtiene un índice de pobreza de la localidad en estudio, aplicándola con los resultados de cada hogar y promediándolos de acuerdo al número de éstos; entonces se tiene:

(4)

$$IP_c = \frac{1}{h}\sum_{j=1}^{h} IP_j$$

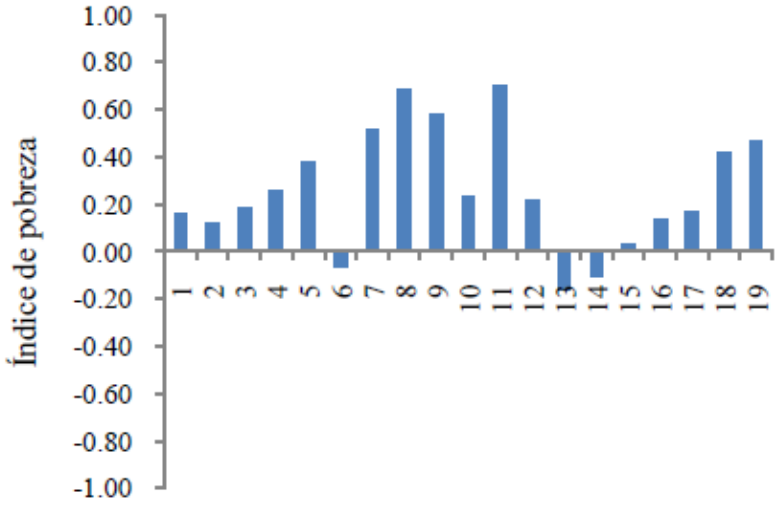
Donde:

IPc es el índice de la pobreza en la comunidad rural de estudio.

h es la cantidad de hogares evaluados.

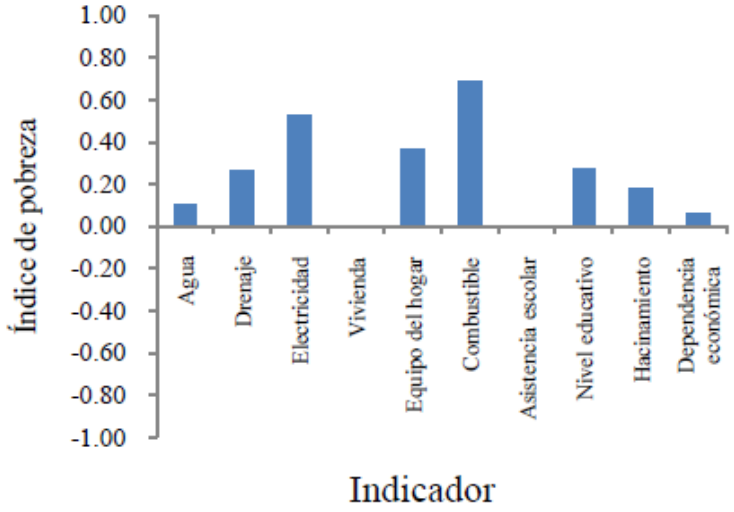
El índice de pobreza encontrado en Tepisuac fue IPc=0.26; la figura 1 muestra la pobreza por hogar.

Fig. 1 Índice de la pobreza por familia en Tepisuac.



Por su parte, la figura 2 ilustra la pobreza según las necesidades básicas analizadas.

Fig. 2 Índice de la pobreza en Tepisuac según necesidad básica.



Como se observa en esta última gráfica, la carencia de electricidad tiene un impacto importante en la situación de la localidad. Los pobladores de Tepisuac reseñan que hace unos 13 años, el gobierno mexicano les dotó de sistemas fotovoltaicos a unos 6,000 pesos cada uno, consistentes en un panel solar de 75W, un regulador y una batería; actualmente, sólo 9 de 15 sistemas funcionan, pero lo hacen deficientemente.

3.2 Necesidades de electricidad

Los habitantes de Tepisuac requieren energía eléctrica para satisfacer sus necesidades básicas domésticas, así como de uso público y productivo, ya que los sistemas fotovoltaicos

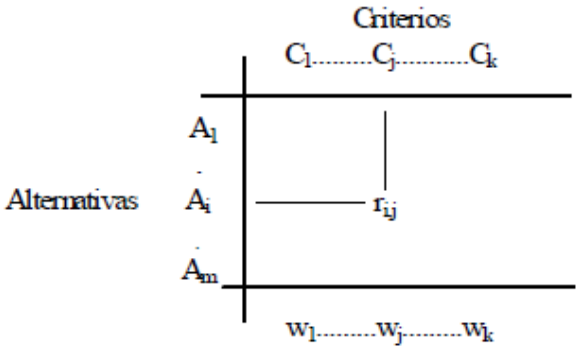
realmente no resuelven en nada su situación. Se estimó un consumo eléctrico doméstico para iluminación (que garantice un nivel de al menos 100 luxes) y aparatos diversos (televisor, DVD, radio, refrigerador, ventilador, horno microondas, plancha y licuadora), así como para alumbrado público, escuela y centro de salud. Se hizo también un análisis de requerimientos para actividades productivas que pudieran desarrollar los habitantes. Las necesidades de electricidad para todos los habitantes de Tepisuac se estimaron en 128kWh al día y una demanda de 33kW considerando un factor de coincidencia dado por la norma correspondiente.

3.3 Recursos energéticos

Para satisfacer las necesidades eléctricas de Tepisuac se consideraron dos fuentes renovables de energía y dos convencionales. El poblado está localizado junto al río Chapalagana y en una zona de considerable energía solar; el río aporta en su nivel más bajo unos 400L/s con una caída probable de 15m y la insolación promedio es de 5.8kWh/m2/día. La distancia a la red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es de poco más de 8km y se puede comprar diesel para un generador eléctrico a 23km.

3.4 Encabezamientos

Por sí mismos, los cuatro recursos energéticos pueden abastecer la electricidad de la localidad pero, ¿cuál es la mejor opción? Para tomar la decisión, en este trabajo se utilizaron los siguientes criterios de selección con un peso según su importancia (en paréntesis en la escala 0 a 10), tomando en cuenta la opinión de expertos: costos (10), eficiencia del sistema (7), generación de empleos (9), aceptación social (10), calificación requerida para operar el sistema (8), necesidades de mantenimiento (8), impacto ambiental (10), emisiones de CO2 (10), distancia de la fuente de energía (8) y estado de desarrollo de la tecnología (7). Entonces se hace un análisis como sigue:



Donde:

$r_{i,j}$ es la evaluación de la alternativa *i* con respecto al criterio *j*.

A_i es el conjunto discreto de alternativas.

C_i es el conjunto discreto de criterios.

w_j es el factor de peso.

m es el número de alternativas.

k es el número de criterios.

Dado que se tienen criterios a maximizar y minimizar, así como cuantitativos y cualitativos, se obtiene un valor normalizado para cada evaluación según lo siguiente:

(5)

$$\text{Valor normalizado} = \frac{\left|X_{i,j} - X_{max}\right|}{X_{max} - X_{min}}$$

(Criterios a minimizar)

$$\text{Valor normalizado} = \frac{X_{i,j} - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

(Criterios a maximizar)

(6)

Donde:

Xi,j es la evaluación de la alternativa i con el criterio j.

Xmax es la máxima evaluación de la escala para criterios cualitativos o la máxima evaluación realizada para las alternativas en un mismo uso final para criterios cuantitativos.

Xmin es la mínima evaluación de la escala para criterios cualitativos o la mínima evaluación realizada para las alternativas en un mismo uso final para criterios cuantitativos.

La obtención de la función objetivo para cada alternativa i se obtiene con la siguiente expresión:

(7)

$$F_i = \sum_{j=1}^{N} w_j \cdot r_{i,j} \Big/ \sum_{j=1}^{N} w_j$$

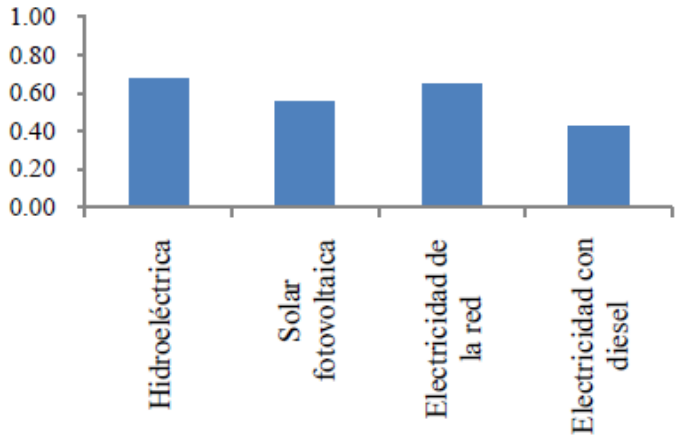
Donde:

Fi es la función de ponderación lineal.

N es el número de criterios.

El resultado del proceso se muestra en la figura 3, en que el valor mayor en una escala (0,1) representa la mejor opción.

Fig. 3 Selección de alternativas por ponderación lineal.



Se puede observar que la alternativa hidroeléctrica sería la mejor para esta localidad rural; sin embargo, la extensión de la red de CFE también parece ser buena opción y la fotovoltaica no está lejos. Con la intención de reducir errores por la subjetividad que el proceso puede representar, se utilizan luego dos operadores difusos. El uso de éstos hace más flexible al proceso de selección dándole prioridad a los criterios de mayor peso. El operador “mínimo” y “máximo” de la lógica difusa se propuso desde 1965 [3] y se ha aplicado a la toma de decisiones a partir de 1970 [4]; el operador permite tener una perspectiva diferente en la solución de problemas como el caso que ocupa este trabajo. El análisis se realiza a partir de los mismos criterios y sus escalas pero, para combinar los factores de peso y las evaluaciones en cada criterio en el mismo rango de variación, se normaliza el factor de peso según la siguiente expresión.

(8)

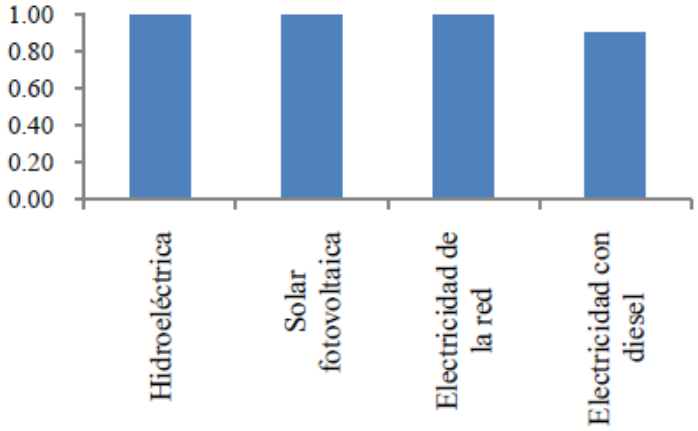
$$f_{pnj} = w_j / w_{\max}$$

Donde:

*f*pnj es el factor de peso normalizado del criterio j.

De esta manera, si el valor normalizado de la evaluación de un criterio coincide con fpnj, el resultado de la función objetivo será igual a 1 o a su valor máximo. La figura 4 ilustra el resultado al aplicar este operador difuso.

Fig. 4 Selección de alternativas con el operador difuso "mínimo" y "máximo".



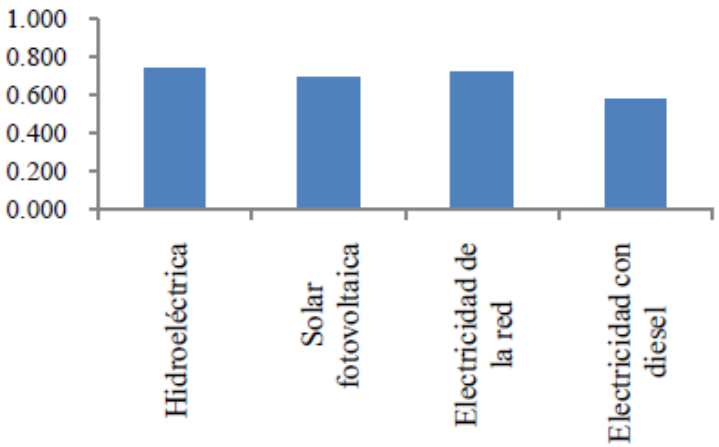
Lo que indica este escenario es que la opción hidroeléctrica, fotovoltaica y la red de CFE satisfacen los criterios de mayor peso y por tanto cualquiera de estas 3 alternativas pueden ser satisfactorias. El segundo operador difuso utilizado en este trabajo está dado por la siguiente ecuación:

(9)

$$h_\alpha = \left(\frac{a_1^\alpha + a_2^\alpha + a_3^\alpha + \cdots + a_n^\alpha}{n} \right)^{1/\alpha}$$

El valor de α puede afectar significativamente el valor de la función objetivo. En efecto, si α=1, el resultado será el promedio (con los mismos valores de la ponderación lineal); conforme α aumenta, crece la importancia del criterio de mayor peso, por lo que si α tiende al infinito el resultado converge al máximo valor [5]. La figura 5 contiene el resultado de la aplicación del operador difuso hα, en el que α=3 para darle un peso adicional, pero no excesivo, a los criterios de mayor importancia.

Fig. 5 Selección de alternativas con el operador difuso hα.



3.5 Conclusiones

Si las dificultades técnicas para llevar agua a Tepisuac para operar una central hidroeléctrica se superan, sin duda se constituye como la mejor alternativa energética. No obstante, considerando que la energía solar fotovoltaica y la extensión de la red eléctrica igualmente son adecuadas para Tepisuac, debe considerarse un análisis de restricción. Si bien la opción de CFE satisface totalmente el criterio de "aceptación social", no así los otros tres criterios de igual importancia: costo, impacto ambiental y emisiones de CO2.

Una combinación de energía hidráulica y solar puede representar un esquema aún más conveniente, ya que el perfil de demanda de una localidad rural con usos eléctricos domésticos, públicos y productivos lo facilitaría. Efectivamente, un sistema fotovoltaico generaría la electricidad cuando hay más energía solar para abastecer las actividades productivas, mientras la hidráulica para cubrir el pico de demanda de la tarde y noche. Se puede tener un sistema híbrido que se mantiene en los criterios de costo, aceptación y medio ambiente.

La utilización de criterios múltiples con el apoyo de la lógica difusa puede facilitar el complejo proceso de selección de opciones energéticas en localidades rurales, para que cuenten con alternativas que realmente les ayuden a salir de la miseria en que viven.

3.6 Referencias

Bellman, R. 1970. "Decision making in a fuzzy environment", Management Science, vol. 17, pp. 141-164.

Boltvinik, J. 1992. El método de medición integrada de la pobreza. Una propuesta para su desarrollo, Comercio Exterior, vol. 42, núm. 4, abril de, pp. 354-365.

Klir, G. J. 1995. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Applications. Prentice Hall PTR.

Martínez, D. 2010. No basta satisfacer las necesidades básicas de energía. Propuesta de un modelo de intervención energética más amplio para reducir la pobreza rural. 6° Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba.

Zadeh, L. A. 1965. "Fuzzy sets", Information and Control, vol. 8, pp. 338-353.

Correspondencia (Para más información contacte con):

E-mail: dmartinez@dip.udg.mx

E-mail: hectorquintero@yahoo.com