

APLICACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA EN LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA EL DESARROLLO DE COMUNIDADES RURALES

D. Martínez González¹, R. Ruelas Lepe¹ & A. Borroto Nordelo²

1. Departamento de Ingeniería de Proyectos, Universidad de Guadalajara, México

2. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba

dmartinez@dip.udg.mx, rruelas@dip.udg.mx, aborroto@ucf.edu.cu

Recibido para evaluación: 10 de Noviembre de 2008

Aceptación: 5 de Diciembre de 2008

Entrega de versión final: 9 de Diciembre de 2008

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología de selección de alternativas energéticas para localidades rurales, integrando criterios múltiples. En el análisis se emplea la lógica difusa para reducir las imprecisiones derivadas del carácter subjetivo de las escalas o factores de peso de algunos criterios. La metodología ha sido aplicada de manera parcial en una localidad rural mexicana cuyos resultados se presentan también en este documento.

Palabras Clave: Energéticas, Comunidades rurales, Lógica difusa, Toma de decisiones.

Abstract

This work proposes a methodology to select energy alternative for rural areas integrating multiple criteria. The analysis uses fuzzy logic to reduce unprecision derived from the subjective nature of the scales or weights from some criteria. The methodology has been partially applied in a Mexican rural location, the results are also shown in this document.

Keywords: Energy alternatives, Rural communities, Fuzzy logic, Decision making.

1. INTRODUCCIÓN

La pobreza se encuentra presente en gran parte de comunidades rurales en nuestros países en vías de desarrollo, que carecen de los servicios más esenciales como agua potable, drenaje, escuela, hospitales, electricidad, vivienda adecuada, etc. Pero no sólo las condiciones domésticas de vida son difíciles, sino que carecen de la capacidad de desarrollar actividades productivas y sociales para mejorar la calidad de sus vidas. La falta de una adecuada infraestructura energética es un factor determinante en su pobreza, ya que prácticamente todas las necesidades básicas pueden

ser satisfechas mediante un mayor consumo de energía.

Las universidades de Guadalajara (México) y Cienfuegos (Cuba) han estado desarrollando un proceso de selección de alternativas energéticas que contribuyan al progreso de localidades rurales [1]. La Figura 1 ilustra los pasos generales de la metodología de selección e intervención energética, aunque en este trabajo se explica con más amplitud lo concerniente a la solución de la matriz de alternativas y a la evaluación de la intervención energética en Tepisuac, localidad rural mexicana.

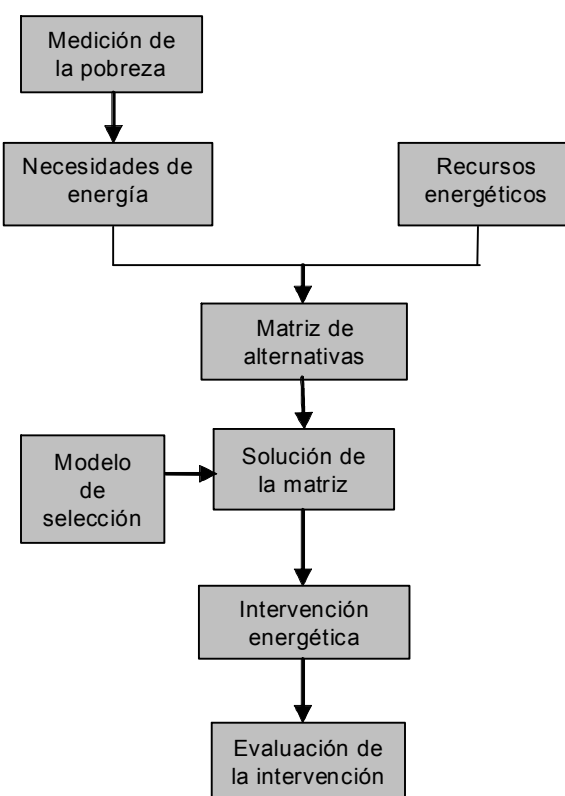


Figura 1. Proceso de intervención energética en comunidades rurales.

La selección de alternativas energéticas se realiza considerando criterios múltiples para integrar al análisis factores no sólo económicos, sino también sociales y ambientales. Dado el carácter subjetivo de algunas evaluaciones, escalas diferentes, proceso de normalización de las escalas y la asignación de factores de peso, se ha recurrido a lógica difusa para obtener resultados más confiables [2]. La intervención energética en Tepisuac ha dado resultados muy interesantes en cuanto a la reducción de la pobreza de sus habitantes.

2. MEDICIÓN DE LA POBREZA EN TEPISUAC, MÉXICO

Esta primera etapa de la metodología tiene un doble propósito: establecer un nivel de referencia para futuras intervenciones y conocer las características de la localidad que permitan establecer las necesidades de energía y los criterios de selección. La pobreza se midió mediante el método de las necesidades básicas insatisfechas ya que además de proporcionar la

posibilidad de obtener una escala numérica, ofrece también información de las propias necesidades de energía. La escala utilizada fue 1 para aquellas familias sin satisfacer ninguna de sus necesidades (pobres) y -1 para aquellos que han podido satisfacer todas sus necesidades (no pobres). La evaluación inicial en Tepisuac abarcó 46 familias y los resultados se ilustran en la Figura 2.

En promedio, Tepisuac mostró un índice de pobreza de 0.4 y una incidencia que mostró que el 93% de las familias se encontraba en la pobreza y 7% en lo que se denominó el umbral de la pobreza.

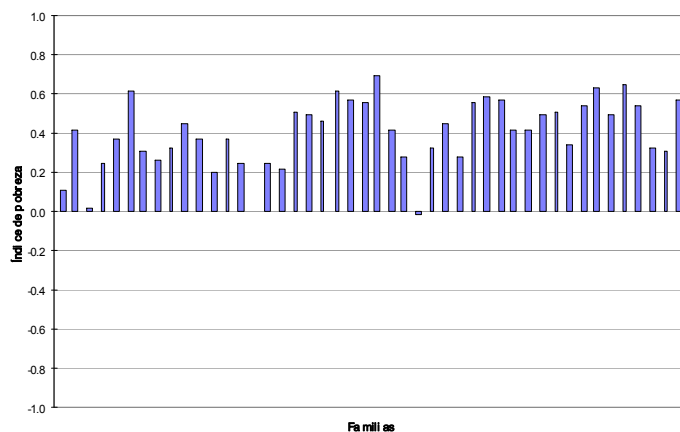


Figura 2. Pobreza en Tepisuac antes de la intervención energética.

3. MATRIZ DE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS

La matriz de alternativas surge a partir de las necesidades de energía que tienen en la localidad rural y los recursos energéticos disponibles para satisfacerlas. En Tepisuac se encontraron seis necesidades básicas de energía, de las cuales cinco son domésticas y una comunal; la evaluación de los recursos energéticos ofreció una gama entre las que se encontraron cinco fuentes de energía renovables y cinco no renovables. Como lo muestra la Tabla 1, se obtiene una matriz de alternativas en que para cada necesidad de energía puede haber más de un recurso energético para satisfacerla; elegir cuál de ellas es la mejor constituye la problemática fundamental a resolver con la metodología que se presenta en este trabajo.

Tabla 1. Matriz Necesidades/Recursos de Energía

Recursos energéticos	Necesidades de energía				
	Cocina	Bombeo de agua	Illum.	Aparatos domest. caliente	Escuela
Diesel	-	9	-	-	-
Gas licuado	1	-	-	-	21
Leña	2	-	-	-	22
Biogás	3	10	12	-	23
Carbón veg.	4	-	-	-	24
Solar (térmica)	5	-	-	-	25
Solar (FV)	-	-	13	17	-
Electricidad ¹	6	11	14	18	26
Electricidad ²	7	-	15	19	27
Electricidad ³	8	-	16	20	28

Notas: ¹ Electricidad de la red, ² Electricidad generada con diesel y ³ Electricidad generada con gasolina.

4. SOLUCIÓN DE LA MATRIZ DE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS

En esta metodología se evalúa cada alternativa de acuerdo a diferentes criterios pudiendo ser éstos de índole cuantitativa o cualitativa y procesar dichas evaluaciones para seleccionar la “mejor” variante o establecer un orden de prioridad. El núcleo del proceso es la denominada matriz de decisión o de impactos (Figura 3), la cual recoge las evaluaciones realizadas a cada alternativa, con respecto a cada uno de los criterios propuestos, determinándose además los factores de peso de cada uno de los criterios [3].

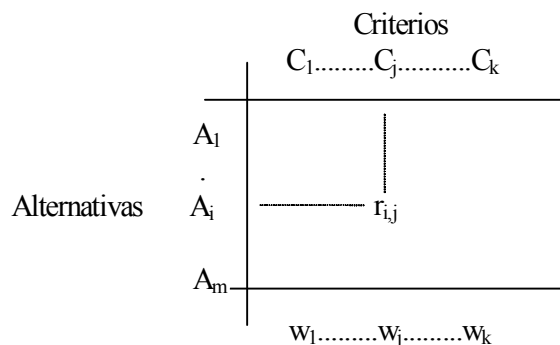


Figura 3. Matriz de decisión o de impactos.

Donde:

r_{ij} es la evaluación de la alternativa i con respecto al criterio j ,

A_i es el conjunto de alternativas,

C_j es el conjunto de criterios,

w_k son los factores de peso de los criterios, m es el número de alternativas y k es el número de criterios.

El análisis inicial de la situación económica y social en Tepisuac dio elementos para establecer los criterios a tomar en cuenta en la selección; el factor de peso de estos criterios se obtuvo consultando a expertos y personas de la misma localidad rural. La Tabla 2 recoge los criterios y sus factores de peso para este caso en particular.

Tabla 2. Criterios de Selección y sus Factores de Peso

	Criterio	Factor de peso
1	Costos directos o internos	0.167
2	Eficiencia del sistema	0.125
3	Generación de empleos	0.200
4	Aceptación social	0.333
5	Calificación para la operación	0.143
6	Mejoramiento de la alimentación	0.200
7	Necesidades de mantenimiento	0.143
8	Posibilidades de construcción local	0.143
9	Impacto ambiental	0.167
10	Emisiones de CO ₂ al medio	0.100
11	Ubicación de la fuente energética	0.143
12	Estado de desarrollo de la tecnología	0.111

La evaluación de las alternativas para cada criterio dio resultados en escalas cualitativas y cuantitativas, por lo fue necesario normalizar dichas evaluaciones mediante (1) para criterios a minimizar y (2) para criterios a maximizar.

$$r_{ni,j} = \frac{|r_{i,j} - r_{\max}|}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (1)$$

$$r_{ni,j} = \frac{r_{i,j} - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (2)$$

Para ilustrar el proceso, en la Tabla 3 se pueden apreciar las evaluaciones normalizadas para la alternativa “cocinar con gas licuado” respecto a cada uno de los doce criterios.

4.1. Ponderación lineal

La función objetivo (F_i) para cada alternativa energética i es calculada ponderando linealmente los criterios, es decir multiplicando cada evaluación ($r_{i,j}$) por el factor de peso del criterio j (w_j) y dividiendo el producto por la suma de los factores de peso, como se expresa en (3).

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^k w_j \cdot r_{ni,j}}{\sum_{j=1}^k w_j} \quad (3)$$

La Tabla 3 muestra también el resultado de la función objetivo para la alternativa “cocinar con gas licuado” a manera de ejemplificar todo el proceso, cuyos resultados se recogen en la Tabla 4 donde se indica también el orden jerárquico de las alternativas energéticas según la escala 0, 1.

Tabla 3. Cálculo de la Función Objetivo de la Alternativa Cocinar con Gas Licuado

Criterio	Factor de peso (w_j)	Evaluación ($r_{i,j}$)	Evaluación normalizada ($r_{ni,j}$)
1	0.167	0.580\$/kWh	0.887
2	0.125	36%	0.882
3	0.200	0.003e/kWh	0.330
4	0.333	3	1.000
5	0.143	1	1.000
6	0.200	2	0.500
7	0.143	1	1.000
8	0.143	2	0.333
9	0.167	7	0.333
10	0.100	0.620kg/kWh	0.910
11	0.143	2	0.200
12	0.111	3	1.000
$F_i =$			0.698

Tabla 4. Solución de la Matriz por Ponderación Lineal

Recursos energéticos	Necesidades de energía					
	Cocina	Bombeo de agua	Ilum.	Aparatos domest.	Agua caliente	Escuela
Diesel	0.473 (3)					
Gas licuado	0.698 (2)					0.617 (4)
Leña	0.722 (1)					0.625 (3)
Biogás	0.690 (3)	0.628 (2)	0.457 (4)			0.689 (2)
Carbón vegetal	0.587 (4)					0.551 (5)
Solar (térmica)	0.529 (6)					0.706 (1)
Solar (FV)			0.494 (2)	0.392 (4)	0.477 (2)	
Electricidad ¹	0.532 (5)	0.673 (1)	0.587 (1)	0.585 (1)	0.470 (6)	0.545 (1)
Electricidad ²	0.378 (7)			0.486 (3)	0.448 (2)	0.380 (7)
Electricidad ³	0.368 (8)			0.456 (5)	0.429 (3)	0.377 (8)
					0.396 (3)	

Notas: ¹ Electricidad de la red, ² Electricidad generada con diesel y ³ Electricidad generada con gasolina.

Los resultados señalan que las mejores alternativas energéticas serían: leña para cocinar, solar térmica para agua caliente y la extensión de la red eléctrica para bombeo de agua, iluminación, electrodomésticos y la escuela. Sin embargo, la diferencia entre algunos de los valores más altos obtenidos y los que le siguen no es tan grande, como es la cocción de alimentos con leña y el gas licuado y calentamiento de agua con energía solar y biogás. Es importante considerar lo anterior ya que a que uno de los inconvenientes de la ponderación lineal es la imprecisión que puede haber por el carácter subjetivo de algunas evaluaciones, las escalas utilizadas, el proceso de selección y los factores de peso asignados; esta subjetividad puede derivar en errores en el momento de decidir por alguna alternativa, por lo que se ha recurrido a la lógica difusa para reducir la incertidumbre.

4.2. Lógica difusa

El uso de los operadores puede brindar más flexibilidad al proceso de selección de alternativas permitiendo dar prioridad a criterios con el mayor peso. El operador min y max de la lógica difusa ha sido propuesto desde 1965 [4], y su aplicación a los problemas de toma de decisiones, desde 1970 [5]. Hoy en día siguen teniendo mucha aplicación ya que permiten tener una perspectiva

diferente en la solución de un problema tal como se muestra más adelante. El análisis se realiza a partir de los mismos criterios y sus escalas, pero con el fin de poder combinar los valores de los factores de peso y los valores normalizados de los criterios, antes es necesario tener valores dentro del mismo rango de variación para lo que se normaliza el factor de peso utilizando (4), con lo que se obtiene por lo menos un valor unitario para los factores de peso normalizados.

$$f_{pnj} = \frac{W_j}{W_{\max}} \quad (4)$$

Donde f_{pnj} es el factor de peso normalizado del criterio j .

De esta manera, y como lo muestra la Tabla 5, si el valor normalizado de la evaluación de un criterio coincide con este valor, entonces el resultado correspondiente al valor de la función objetivo va a ser igual a uno, o igual a su valor máximo.

Tabla 5. Función Objetivo de la Alternativa Cocinar con Gas Licuado mediante el Operador Max y Min

Criterio	Factor de peso (w_j)	Factor de peso normalizado (f_{jni})	Evaluación normalizada a (r_{ni})	Mín
1	0.167	0.500	0.887	0.500
2	0.125	0.375	0.882	0.375
3	0.200	0.600	0.330	0.330
4	0.333	1.000	1.000	1.000
5	0.143	0.428	1.000	0.428
6	0.200	0.600	0.500	0.500
7	0.143	0.428	1.000	0.428
8	0.143	0.428	0.333	0.333
9	0.167	0.500	0.333	0.333
10	0.100	0.300	0.910	0.300
11	0.143	0.428	0.200	0.200
12	0.111	0.333	1.000	0.333
			$F_j =$	1.000

Conforme a la Tabla 5, el hacer uso de los conceptos de la lógica difusa permite tener resultados indicando, en este caso en particular, que el criterio más importante

es totalmente satisfecho. La Tabla 6 contiene los resultados obtenidos para todas las alternativas de la matriz mediante el operador max y min.

Tabla 6. Solución de la Matriz con el Operador Difuso Max-Min.

Recursos energéticos	Necesidades de energía					
	Cocina	Bombeo de agua	Ilum.	Aparatos domest.	Agua caliente	Escuela
Diesel		0.600				
Gas licuado	1.000				1.000	
Leña	1.000				1.000	
Biogás	0.600	0.600	0.600		0.600	
Carbón vegetal	1.000				0.600	
Solar (térmica)	0.600				0.600	
Solar (FV)			0.500	0.500		0.500
Electricidad ¹	0.500	1.000	1.000	1.000	0.500	1.000
Electricidad ²	0.500		0.600	0.600	0.600	0.600
Electricidad ³	0.500		0.600	0.600	0.600	0.600

Notas: ¹ Electricidad de la red, ² Electricidad generada con diesel y ³ Electricidad generada con gasolina.

Las alternativas con valor uno aseguran opciones que satisfacen el criterio más importante en esta localidad rural: la aceptación social.

$$F_i = \left[\frac{(f_{pn1} \cdot r_{ni,1})^\alpha + (f_{pn2} \cdot r_{ni,2})^\alpha + \dots + (f_{pnk} \cdot r_{ni,k})^\alpha}{k} \right]^{1/\alpha} \quad (5)$$

Otro operador difuso utilizado en este trabajo está dado por (5). El valor de α puede afectar de manera importante el valor de la función objetivo. Si $\alpha=1$, la función objetivo es el promedio (dando valores en la misma proporción de la ponderación lineal); en la medida que α crece, va aumentando la importancia del criterio con mayor peso. De esta forma, si α tiende al infinito, el resultado converge al máximo valor [6].

En este trabajo se utiliza $\alpha=3$ para darle un peso adicional, pero no excesivo, al criterio de mayor importancia. De esta forma la Tabla 7 agrupa los resultados de las alternativas energéticas mediante este último operador difuso.

Tabla 7. Solución de la Matriz con $\alpha=3$

Recursos energéticos	Necesidades de energía					
	Cocina	Bombeo de agua	Ilum.	Aparatos domest.	Agua caliente	Escuela
Diesel		0.341				
Gas licuado	0.486				0.485	
Leña	0.497				0.486	
Biogás	0.405	0.400	0.345		0.404	
Carbón vegetal	0.493				0.366	
Solar (térmica)	0.334				0.394	
Solar (FV)			0.331	0.300		0.335
Electricidad ¹	0.331	0.508	0.485	0.486	0.326	0.473
Electricidad ²	0.267		0.360	0.341	0.322	0.333
Electricidad ³	0.265		0.349	0.335	0.323	0.333

Notas: ¹ Electricidad de la red, ² Electricidad generada con diesel y ³ Electricidad generada con gasolina.

5. EVALUACIÓN DE LA INTERVENCIÓN ENERGÉTICA EN TEPISUAC, MÉXICO

En los tres métodos de selección utilizados en este trabajo, la extensión de la red eléctrica hacia Tepisuac resultó con los mayores valores para el bombeo de agua, la iluminación, los electrodomésticos y la escuela; esta alternativa fue seleccionada y realizada en la localidad, con lo que se estaba entonces en posibilidades de evaluar su impacto. Aproximadamente 3 años después de la intervención se realizó una nueva medición de la pobreza con el mismo método de las necesidades insatisfechas; la Figura 4 muestra el índice de pobreza en Tepisuac luego de la segunda medición.

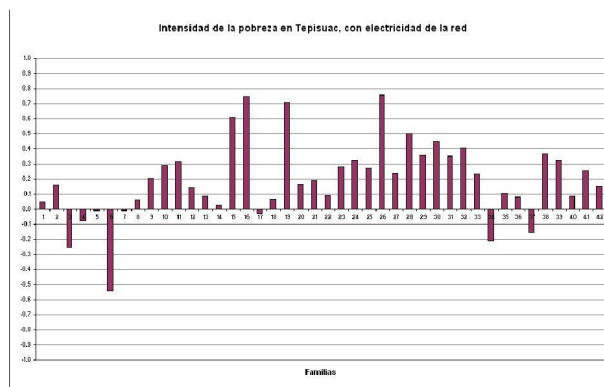


Figura 4. Pobreza en Tepisuac después de la intervención energética.

Con respecto a la primera evaluación, el índice promedio de la pobreza en la localidad se redujo a 0.2. La relación que pudo obtenerse entre el índice de pobreza de las familias de Tepisuac y el consumo de electricidad se ilustra en la Figura 5.

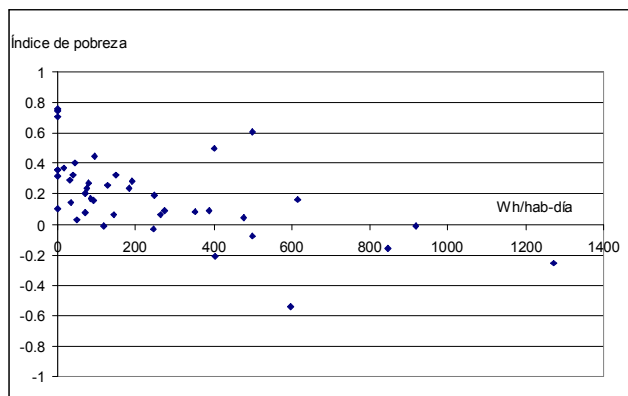


Figura 5. Índice de pobreza y consumo de electricidad en Tepisuac.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque la intervención energética en Tepisuac no ha concluido, ya que faltan acciones encaminadas a mejorar la infraestructura energética para cocinar y calentar agua, la extensión de la red eléctrica demuestra que la situación económica y social de la localidad está mejorando.

La mejor selección de alternativas energéticas es un proceso complejo. En este trabajo se propone hacer el análisis mediante operadores difusos para combinar el peso de diferentes criterios y sus evaluaciones respecto a la gama de alternativas energéticas, tratando de reducir la incertidumbre de la subjetividad de los procesos tradicionales.

BIBLIOGRAFÍA

1. D. Martínez-González, 1999. Energización de Comunidades Rurales Ambientalmente Sostenibles, Calli: Contactos Mundiales LTDA,
2. D. Martínez-González y R. Ruelas-Lepe, 2006. Metodología de Selección de Alternativas Energéticas para el Desarrollo de Comunidades Rurales. Caso de Estudio Tepisuac, México, presentado en el 4º Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba,

3. S. Barba-Romero, 1993. Evaluación Multicriterio de Proyectos de Ciencia y Tecnología, Editorial Nueva Sociedad, pp. 297-318.
4. L. A. Zadeh, 1965. Fuzzy sets, Information and Control, vol. 8, pp. 338-353,
5. R. Bellman, 1970. Decision making in a fuzzy environment, Management Science, vol. 17, pp. 141-164,
6. G. J. Klir, 1995. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Applications. Prentice Hall PTR,