

APLICACIONES DE LOS MODELOS MULTICRITERIALES A LA ENERGÍA, LA SOCIEDAD Y EL MEDIO AMBIENTE.

Manuel Eduardo Cortés Cortés, Anibal Borroto Nordelo, Carlos Alberto Álvarez Bravo
Universidad de Cienfuegos, Cuba.

ABSTRACT

Modernity brings with it many challenges, competitiveness, productivity, save resources, profits, environmental impact and effective utilization of human resources among others, requiring the company decision-making models based on statistical - mathematical and computing.

In this paper multicriterial mathematical models are developed for the selection of energy sources for rural population so as to save resources, are satisfied with the applications needed and decrease the damage to the environment. Among the objectives of the proposed multicriteria model are the productive, economic, the social and ecological among others. Presents an application of a model in the selection Multicriteria Energy Case Study in a real rural population and compared with modeling results unicriterial.

KEYWORDS: Multicriteria models, Saaty's Hierarchy model, multicriterial linear programs, sources of energy, environment

MSC: 90C29

RESUMEN

La Modernidad conlleva muchos retos, la competitividad, la productividad, el ahorro de recursos, las ganancias, el impacto con el medio ambiente y la utilización efectiva de los recursos humanos entre otros, que exigen en la empresa una toma de decisiones basada en los modelos estadísticos – matemáticos y la computación.

En el presente trabajo se desarrollan modelos matemáticos multicriteriales para la selección de fuentes de energía para una población rural de forma tal que se ahorren recursos, se cumplan con las aplicaciones que se necesitan y se disminuya la afectación al medio ambiente. Entre los objetivos del modelo multicriterial planteado se encuentran los productivos, los económicos, los sociales y los ecológicos entre otros. Se presenta una aplicación de un Modelo Multicriterial en la selección de energía en un Caso de Estudio una población rural real y se comparan con resultados de la modelación unicriterial.

1. INTRODUCCIÓN

En los cambios profundos, acelerados y generalizados que ha vivido la Humanidad en las últimas décadas se encuentra una de las causas determinantes en la articulación, estrecha y orgánica, entre el desarrollo científico, los avances tecnológicos y su aplicación en la esfera de la producción, la distribución y el consumo de bienes y servicios. [8].

La influencia de la tecnología sobre la sociedad está en el análisis de los impactos y riesgos sociales de la misma y la influencia de la sociedad sobre la tecnología nos lleva a la economía y sociología de la tecnología sociológica del conocimiento científico.

Todo ello implica la evaluación de tecnologías y el análisis de políticas científico tecnológicas que unidas a los valores morales, políticos y sociales forman las regulaciones legislativas y políticas públicas. [9].

En la economía de mercado los precios determinan la utilización de los recursos en la competencia, y tradicionalmente solo se toman en cuenta para fijar estos precios los costos directos o internos de la producción de las empresas, pero existen costos externos o externalidades de este proceso que no se reflejan en los precios de la producción de bienes en el mercado, como es el caso de los impactos sociales y ambientales [5]. Esto es, se fijan precios en el mercado que reflejan solo los intereses de productores y consumidores directamente vinculados en el proceso productivo y no los de toda la sociedad en su conjunto.

Mientras que los costos externos, ecológicos o sociales cuentan con el importe sobre la salud humana, los daños al medio ambiente, la flora, la fauna, el clima (emisión de gases invernaderos) el agotamiento de

las reservas naturales, el desempleo, las guerras por citar los más importantes [7], pueden producir la desaparición de la raza humana.

Con el desarrollo de la sociedad, el criterio económico se convirtió en el factor determinante en la selección de las posibles fuentes energéticas, así como de la tecnología a utilizar. Los costos directos de la producción de energía, los cuales determinan los precios en el mercado, han constituido la base de esta selección. Sin embargo, estos costos solo reflejan las relaciones e intereses de los productores, distribuidores y consumidores, y no los de toda la sociedad, algunos autores comienzan a plantear la necesidad de realizar otros análisis para la selección de alternativas energéticas [10], donde además de considerar el factor económico se tengan en cuenta otros, como es el caso de los impactos sociales y ambientales.

Los tipos de impactos ambientales [6] pueden enumerarse como:

- 1) La sobre utilización de la naturaleza.
- 2) La excesiva concentración de productos de desechos naturales.
- 3) Introducción en el medio de materiales que no forman parte de ningún ecosistema con consecuencias ambientales.
- 4) Introducción de productos naturales o sintéticos que produzcan cambios ambientales globales.

Los efectos que pueden producir malos usos de la energía han constituido preocupación de muchos estudiosos del tema. En particular, se han desarrollado proyectos que a la par que proponen mejoras en el uso de los recursos de que se dispone, también presentan marcados intereses de reducción de efectos negativos.

Lo antes dicho lleva a la convicción de la necesidad de utilizar modelos Multicriteriales para la solución de los problemas actuales.

2. DESARROLLO

Se presenta un Caso de Estudio Real que ha sido resuelto por varios Modelos Multicriteriales como se expone a continuación.

Caso Estudio para la selección de alternativas energéticas (planificación energética) en un proyecto de comunidad rural ambientalmente sostenible ubicada en las áreas cañeras de un Central Azucarero, en un municipio de la Provincia de Cienfuegos, Cuba. [2]

Planteamiento del problema

La comunidad comprende 30 viviendas, con una población total estimada de 120-200 personas y un área de 9 000 m², con disponibilidad de agua subterránea, bosques forestales con fines energéticos, dos lagunas naturales, barro para construcción de viviendas y un módulo pecuario que genera residuos con potencial energético apreciable.

Alternativas Energéticas

La energía se utiliza en una amplia gama de actividades dentro de un sistema rural. Para fines prácticos, sin embargo, los requerimientos energéticos se pueden dividir en cuatro servicios básicos: calor, potencia mecánica, iluminación y comunicaciones.

Una vía factible para atacar un problema de selección de alternativas energéticas lo constituye el método de Saaty, también conocido como Método de Jerarquía Analítica.

Matriz de alternativas Recurso-Uso Final

Para abordar un problema de este tipo es necesario primeramente conformar una matriz de alternativas recurso-uso final. En la tabla 1 se muestra dicha matriz. Como se puede observar se consideraron todas las fuentes posibles a utilizar, tanto las convencionales como las renovables, pues el propio proceso de selección multicriterial seleccionará las mejores variantes.

Para la aplicación del método se utilizan diferentes criterios (tabla 2), que son recogidos en la función, definida para este caso [1]. En este sentido se prefirió procesar las evaluaciones realizadas por los expertos con dicha función, y no utilizar algún tipo de software especializado, pues de esta manera resulta más ilustrativa y sencilla la demostración.

Tabla 1- Posibles combinaciones recurso - uso final. Variables del Modelo

RECURSOS	USOS FINALES					
	Cocción de alimentos	Bombeo de Agua	Ilumina-Ción	Aplicacio-nes eléctricas	Servicio de agua caliente	
Queroseno	1	-	-	-	-	
Diesel	-	12	-	-	-	
Gas Licuado	2	-	-	-	-	
Carbón vegetal	3	-	-	-	-	
Biogás	4	-	-	-	-	
Leña	5	-	-	-	-	
Briquetas de paja de caña	6	-	-	-	-	
Solar Térmica	7	-	-	-	29	
Solar Fotovoltaica	8	13	19	24	-	
Energía Eólica	Aerogeneradores	-	14	20	25	-
	Energía mecánica	-	15	-	-	-
Hidroelectricidad	9	16	16'	21	26	30
Electricidad de la red	10	17	17'	22	27	31
Electricidad generada con diesel	11	18		23	28	32

12, 15, 16' y 17' - Bombeo Centralizado.

3. MODELOS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

1.- Decisión Multicriterial Discreta (DMD). Este tipo de análisis es utilizado en la selección de alternativas, medidos en un sistema de de criterios, en escala numérica que priorizan las alternativas de decisión.

Entre estos métodos se estudia:

- Utilidad Multiatributo
- Ponderación lineal
- Método analítico de jerarquía (Saaty)
- Método Delphi
- Otros

Estudiaremos dos de ellos combinados para dar solución al Caso de Estudio:

Ponderación lineal y Método Analítico Jerárquico de Saaty.

Se tiene la matriz de diferentes alternativas por filas y diversos criterios por columnas y se quiere la selección y el ordenamiento de las alternativas.

Matriz de pago

		Criterios		
		C_1	C_2	C_k
Alternativas ($F_m \times k$)	A_1	R_{11}	R_{12}	R_{1k}
	A_2	R_{21}	R_{22}	R_{2k}
	A_m	R_{m1}	R_{m2}	R_{mk}
	Pesos	W_1	W_2	W_k

- m : Número de alternativas
- k : Número de criterios
- A_i : Alternativas
- C_j : Criterio discreto k
- W_j : Factor de peso
- R_{ij} : Valor que se le da a la alternativa i según el criterio j

El método consiste en realizar una ponderación lineal de los criterios

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^k W_j * r_{ij}}{\sum_{j=1}^n W_j}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad k \text{ criterios}$$

$$F_i = \frac{W_1 \left(\frac{C_{mn}}{C} \right) + W_2 \cdot E_g + W_3 \left(\frac{A_s}{3} \right) + W_4 \left(\frac{C_p}{3} \right) + W_5 \left(\frac{F_1}{3} \right) + W_6 \left(\frac{3}{IA} \right)}{\sum_{i=1}^6 W_i} \quad (1)$$

- | | | | |
|----------|---|-------|--|
| W_i | Factores de peso | C_p | Calificación requerida del personal:
1-muy calificado, 2-medianamente calificado,
3-poco calificado |
| C_{mn} | Costo directo mínimo de referencia, es el menor de los costos de las combinaciones consideradas en cada uso final, \$/kWh | F_1 | Aprovechamiento de fuentes locales de energía: 1-fuente a más de 10 km, 2-fuente entre 1 y 10 km, 3-fuente a menos de 1 km |
| C | Costo directo de la combinación que se evalúa, \$/kWh | IA | Impacto Ambiental $IA = I + E + R$
I-Intensidad del impacto:
1-baja, 2-media, 3-alta |
| E_g | Eficiencia global. $E_g = E_{ext} \cdot E_{uf}$ con E_{ext} Eficiencia externa y E_{uf} Eficiencia de uso final | E | E-Extensión del impacto:
1-baja, 2-media, 3-alta |
| A_s | Aceptación social: 1-poco aceptada, 2-medianamente aceptada, 3-muy aceptada | R | R-Reversibilidad del impacto:
1-reversible, 2-parcialmente reversible, 3-irreversible |

Determinación de los factores de peso

Para la determinación de los factores de peso se utiliza el Método Jerárquico de Saaty. Las evaluaciones propuestas se realizaron según la escala de Saaty (tabla 3)

Tabla 2 Criterios de Selección

N^0	Criterios C_j
1	Costos internos
2	Eficiencia
3	Aceptación social
4	Calificación del personal
5	Aprovechamiento de las fuentes locales
6	Impacto ambiental

Tabla 3 Escala de comparaciones binarias de Saaty

Valores a_{ij}

1	Si los criterios tienen igual importancia	Ambos criterios contribuyen de igual manera al objetivo
3	Débil A con relación a B	Es levemente mejor B que A
5	Fuerte A con relación a B	Se ve más clara A que B
7	Muy fuerte A con relación a B	A domina claramente a B
9	Absolutamente A > B	A es absolutamente mejor que B
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos apreciaciones	Sirven para afinar el juicio entre dos criterios

Para determinar si las inconsistencias cometidas invalidan la matriz propuesta, se sigue la siguiente metodología propuesta por Saaty: [12]

Tabla 4. Matriz de comparaciones de criterio i (fila) con respecto al j (columna)

Criterios	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
C_1	1	8	3	9	5	1
C_2	1/8	1	1/7	3	1/5	1/8
C_3	1/3	7	1	8	3	1/3
C_4	1/9	1/3	1/8	1	1/7	1/9
C_5	1/5	5	1/3	7	1	1/5
C_6	1	8	3	9	5	1

1. Normalizar los valores de cada columna de la matriz respecto al total por columna y determinar la suma y el promedio por fila

Criterios	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	Suma	Promedio
C_1	0.36	0.27	0.39	0.24	0.35	0.36	1.97	0.32
C_2	0.04	0.03	0.02	0.08	0.01	0.04	0.21	0.03
C_3	0.12	0.24	0.13	0.21	0.20	0.12	1.02	0.17
C_4	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0.13	0.02
C_5	0.07	0.17	0.04	0.16	0.07	0.07	0.60	0.10
C_6	0.36	0.27	0.39	0.24	0.35	0.36	1.97	0.32
Total	2.77	29.33	7.59	37	14.34	2.77	-	-

La suma y los promedios por fila reflejan la ordenación jerárquica de los criterios.

2. Obtener una nueva matriz que resulta de la multiplicación de las columnas de la matriz de comparaciones, por los promedios de cada fila; determinándose posteriormente la suma resultante por fila.

Criterios	C_1 (x0.32)	C_2 (x0.03)	C_3 (x0.17)	C_4 (x0.02)	C_5 (x0.10)	C_6 (x0.32)	Suma
C_1	0.33	0.24	0.48	0.18	0.5	0.33	2.06
C_2	0.04	0.03	0.02	0.06	0.02	0.04	0.21
C_3	0.11	0.21	0.16	0.12	0.3	0.11	1.01
C_4	0.03	0.01	0.03	0.02	0.01	0.03	0.13
C_5	0.07	0.15	0.05	0.14	0.10	0.07	0.58
C_6	0.33	0.24	0.48	0.18	0.5	0.33	2.06

3. Dividir las sumas por las filas del paso 2, por los promedios por fila del paso 1

$$\begin{pmatrix} 2.06 \\ 0.21 \\ 1.01 \\ 0.13 \\ 0.58 \\ 2.06 \end{pmatrix} \div \begin{pmatrix} 0.32 \\ 0.03 \\ 0.17 \\ 0.02 \\ 0.10 \\ 0.32 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.24 \\ 7 \\ 6.31 \\ 6.5 \\ 5.8 \\ 6.24 \end{pmatrix}$$

4. Calcular el Índice de Coherencia

$$IC = \frac{(\lambda_{max}-n)}{(n-1)} \times 100 \quad 2) \quad \text{donde} \quad \lambda_{max} = \frac{6.24+7+6.31+6.5+5.8+6.24}{n} = 6.35$$

n : Número de criterios

IC: 7%

5. Calcular el Cociente de Coherencia

$$CC = \frac{IC}{IC_{aleatorio}} \times 100 \quad (3)$$

$IC_{aleatorio}$ Índice de Coherencia aleatorio: se determina en función de n (tabla 6), estos valores aleatorios resultan de generar un gran número de matrices con evaluaciones entre 9 y 1/9.

$$CC = \frac{0.07}{1.24} = 5.6\%$$

Tabla 5

Tamaño de la matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de coherencia	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tabla 6 Matriz de evaluaciones

RECURSOS	USOS FINALES					
	Cocción de alimentos	Bombeo de agua	Iluminación	Aplicaciones eléctricas	Servicio de agua caliente	
Queroseno	0.325	-	-	-	-	
Diesel	-	0.384	-	-	-	
Gas Licuado	0.402	-	-	-	-	
Carbón vegetal	0.365	-	-	-	-	
Biogás	0.605	-	-	-	-	
Leña	0.390	-	-	-	-	
Briquetas de paja de caña	0.400	-	-	-	-	
Solar Térmica	0.859	-	-	-	-	0.915
Solar Fotovoltaica	0.573	0.550	0.733	0.678	-	
Energía Eólica	Aerogeneradores	-	-	0.838	0.737	-
	Energía mecánica	-	0.550	-	-	-
Hidroelectricidad	-	0.427	0.508	0.539	0.512	0.587
Electricidad de la red	0.356	0.380	0.673	0.676	0.678	0.364
Electricidad generada con diesel	0.347	0.322	-	0.545	0.472	0.297

6. Comprobación

Para que se acepte la matriz de comparaciones debe cumplirse que $CC < IC$. En este caso $5.6\% < 7\%$, por lo que las inconsistencias cometidas no invalidan las evaluaciones realizadas.

Después de comprobada la coherencia de las evaluaciones realizadas, se procede a determinar los pesos de los criterios. El vector peso w resulta el autovector dominante de la matriz de comparaciones, por lo

que puede plantearse la siguiente ecuación: [14]

$$(A - \lambda I)(W) = 0 \quad (4)$$

Donde

A Matriz de comparaciones

λ Autovalores de la matriz

W Vector de los pesos

I Matriz Idéntica

Los autovalores de la matriz se obtienen de la siguiente ecuación

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (5)$$

Solución: [15]

$$25.10^8 \cdot \lambda^5 - 15.10^9 \lambda^4 + 55.10^9 \lambda^3 - 44.42.10^7 \lambda^2 - 21.53.10^9 \cdot \lambda - 24.83.10^8 = 0$$

Autovalor dominante: $\lambda = 6.4$

La desviación del valor de λ con respecto al número de criterios “n”, es una medida de las inconsistencias cometidas en las comparaciones realizadas.

Al sustituir el valor de I en la expresión (4) se obtiene el autovector dominante, o vector de los pesos:

$$W = (0.652, 0.070, 0.325, 0.045, 0.190, 0.652)$$

Después de obtenido el vector de los pesos se procede a evaluar la expresión (1), conformando la matriz de evaluaciones (tabla 5). Los coeficientes de costos y las eficiencias utilizadas en los cálculos [6], se muestran en las tablas 7 y 8 respectivamente. [13]

Tabla 7 Coeficientes de costos

RECURSOS	USOS FINALES					
	Cocción de alimentos	Bombeo de agua	Iluminación	Aplicaciones eléctricas	Servicio de agua caliente	
Queroseno	0.0424	-	-	-	-	
Diesel	-	0.5057	-	-	-	
Gas Licuado	0.0419	-	-	-	-	
Carbón vegetal	0.1183	-	-	-	-	
Biogás	0.0259	-	-	-	-	
Leña	0.1286	-	-	-	-	
Briquetas de paja de caña	0.0635	-	-	-	-	
Solar Térmica	0.0066	-	-	-	0.01	
Solar Fotovoltaica	0.2733	1.3	0.649	0.5591	-	
Energía Eólica	Aerogeneradores	-	-	0.449	0.4257	-
	Energía mecánica	-	2.159	-	-	-
Hidroelectricidad	0.4158	1.415	0.445	0.9341	0.7491	0.4047
Electricidad de la red	0.1646	1.201	0.156	0.4341	0.2807	0.1547
Electricidad generada con diesel	0.2208	1.256	-	0.5441	0.4891	0.2097

Al enfrentar un problema de selección de fuentes energéticas, en primer lugar debe tenerse en cuenta el contexto y los intereses involucrados, con el fin de escoger el método apropiado, sobre todo cuando se quieren reducir los impactos negativos en el medio ambiente y emplear un tipo de energía más amigable

con este.

Tabla 8 Eficiencia (%)

RECURSOS	USOS FINALES											
		Cocción de alimentos		Bombeo de agua		Iluminación		Aplicación eléctrica		Servicio de agua caliente		
	E_{ext}	E_{uf}	E_{global}	E_{glo}	E_{global}	E_{uf}	E_{global}	E_{uf}	E_{global}	E_{uf}	E_{global}	
Queroseno	72	40	28.8	-	-	1	0.2	-	-	40	28.8	
Diesel	72	-	-	30	21.6	-	-	-	-	-	-	
Gas Licuado	72	50	36	-	-	-	-	-	-	50	36	
Carbón vegetal	30	15	4.5	-	-	-	-	-	-	15	4.5	
Biogás	88	50	44	-	-	1	0.8	-	-	50	44	
Leña	95	10	9.5	-	-	-	-	-	-	10	9.5	
Briquetas de paja de caña	94	25	23.5	-	-	-	-	-	-	25	23.4	
Solar Térmica	100	20	20	-	-	-	-	-	-	20	20	
Solar Fotovoltaica	10	80	8	80	8	40	4	60	6	80	8	
Energía Eólica	Aerogeneradores	40	-	-	80	32	40	16	60	24	-	-
	Energía mecánica	40	-	-	60	24	-	-	-	-	-	-
Hidroelectricidad	50	80	40	80	40	40	20	60	30	80	40	
Electricidad de la red	23	80	18.4	80	18.4	40	9.2	60	13.8	80	18.4	
Electricidad generada con diesel	28	80	23	80	23	40	11.5	60	16.8	80	23	

En resumen, se promueve la utilización de la energía solar térmica y el biogás para la cocción de alimentos; la energía solar fotovoltaica y la energía eléctrica de la red para la demanda de electricidad; y de la energía solar térmica para el calentamiento de agua.

El método empleado en la selección permite un ordenamiento de las opciones para cada uso final de la energía, sin constituir un proceso de optimización. En primer lugar existen elementos subjetivos en el proceso y en segundo lugar no permite incorporar restricciones y condiciones específicas del proyecto, como puede ser el caso de la disponibilidad de recursos. En este sentido resulta importante complementar el análisis ya realizado con la aplicación de la Programación Multiobjetivo.

4. PROGRAMACIÓN MULTI OBJETIVO PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS

Este método, también conocido como optimización multiobjetivo, consiste en desarrollar un modelo con varias funciones objetivos a optimizar, donde cada una refleje un criterio a tener en cuenta en la selección. El modelo puede resolverse empleando diferentes métodos matemáticos, entre los cuales pueden mencionarse la Optimización de Pareto, la Programación Lineal Multiobjetivo y la Programación por Metas [11], [3].

La Decisión Multiobjetivo tiene como desventaja que no resulta factible la incorporación de criterios que no se pueden expresar de forma matemática (cualitativos); sin embargo, constituye una herramienta muy fuerte y confiable en los análisis de selección, pues limita la manipulación de los resultados con factores subjetivos, además que brinda en muchos casos resultados numéricos útiles y de gran valor para el analista. Por otra parte, permite incorporar a la selección un conjunto de factores externos o restricciones que reflejan elementos tales como: disponibilidad de recursos, capital disponible, requerimientos específicos del sistema, entre otros.

Los objetivos del Modelo de Programación Lineal Multiobjetivo propuesto son los siguientes: [4]

1. Minimizar los costos directos.
2. Maximizar la eficiencia del sistema.
3. Minimizar el uso de derivados del petróleo.
4. Minimizar emisión de CO_x al medio.

5. Minimizar emisión de SO_x al medio.
6. Minimizar emisión de NO_x al medio.
7. Maximizar el uso de fuentes locales y derivados de la biomasa cañera.

Las restricciones que se plantearon coinciden con los usos finales que se establecieron fijando determinadas demandas mínimas a satisfacer en cada uso final y se muestran a continuación:

Las restricciones del problema:

- 1) Garantizar la energía anual necesaria para la cocción de alimentos. Con un valor calculado de 404106 $Kwh/año$.
- 2) Garantizar la energía anual necesaria para el bombeo de agua. Con un valor calculado de 2506 $Kwh/año$.
- 3) Garantizar la energía anual necesaria para la iluminación. Con un valor calculado de 4320 $Kwh/año$.
- 4) Garantizar la energía anual necesaria para otras aplicaciones eléctricas. Con un valor calculado de 15308 $Kwh/año$.
- 5) Garantizar la energía anual necesaria para el calentamiento de agua. Hasta 8 horas/día,
- 6) Límite de la energía solar térmica para la cocción de alimentos.
- 7) Disponibilidad de queroseno

El Modelo Matemático obtenido presenta 32 variables de decisión, 14 variables de desviación, 7 variables de holgura, 14 restricciones de ellas 7 restricciones de meta y las 7 restantes del sistema y una función objetivo multicriterial.

Para el modelo, según los expertos consultados, se establecieron las siguientes prioridades:

Prioridad 1, objetivos 1, 4, 5 y 6;

Prioridad 2, objetivos 3 y 7;

Prioridad 3, objetivo 2.

Tomando como valores de las prioridades $p_i = 10^{-3 \cdot i}$

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 9 y 10.

Tabla 9- Fuentes seleccionadas en la optimización multiobjetivo.

Usos Finales		Fuentes seleccionadas y resultados de las variables (x_i , $Kwh/año$)
Cocción de alimentos		Biogás (39 425), Solar térmica (9 850)
Bombeo de Agua	Individual	Solar Fotovoltaica (360)
	Colectivo	Electricidad de la red (2 146)
Iluminación		Solar Fotovoltaica (4 320)
Otras aplicaciones eléctricas		Solar Fotovoltaica (15 308)
Calentamiento de agua		Solar Térmica (50 508)

Como se puede apreciar en los resultados resumidos en la tabla 9, al incluir los criterios medio-ambientales en la selección de las fuentes energéticas, las fuentes renovables de energía son promovidas como las mejores variantes en la satisfacción de las necesidades energéticas de la comunidad.

Sin embargo, si se tiene en cuenta solo el criterio económico, lógicamente la solución se desplazará hacia el uso de los combustibles tradicionales que posibilitan lograr mejores indicadores económicos.

En la tabla 10 se realiza una comparación de algunos indicadores importantes de la optimización multiobjetivo, con respecto a una optimización teniendo en cuenta solo el criterio económico. En dicha tabla se puede observar que la optimización multiobjetivo arroja resultados mucho más compatibles con el medio ambiente y acordes con los principios del desarrollo sostenible; en este sentido se observa que con esta solución se evita la emisión al medio ambiente por año de 42 toneladas de CO_x , 943kilogramos de SO_x y 180 kilogramos de NO_x .

Tabla 10- Valor de cada función objetivo.

Función Objetivo	Optimización Monoobjetivo (costos)	Optimización Multiobjetivo
Z_1 - Costos totales, USD / año	8 530.241	13 756.69
Z_2 - Consumo energía primaria <i>Kwh/año</i>	668 494.31	773 324.39
Z_3 - Energía derivados petróleo, <i>Kwh/año</i>	22 134	2 146.59
Z_4 - Emisiones CO_x Kg / año	45 557.6	3 102.49
Z_5 - Emisiones SO_x , Kg / año	1 201.64	258.50
Z_6 - Emisiones NO_x , Kg / año	193.36	13
Z_7 - Energía fuentes locales, <i>Kwh/año</i>	39 425	39425
Valor de la función objetivo global (expresión1)	154.84	

Por otra parte, al considerar los factores ambientales en la selección, se puede apreciar que los costos directos aumentan, aspecto que entra en contradicción con los análisis tradicionales de selección de fuentes de energía. En este sentido se puede señalar, que para la ejecución de un proyecto de inversión generalmente se dispone de un capital limitado; evidentemente, si incluimos esta restricción en el modelo la solución estaría entre las dos variantes analizadas, lo cual se acercaría más a las condiciones reales de nuestros países.

5. CONCLUSIONES

En la actualidad existe la necesidad de realizar análisis multicriteriales en marcos amplios que tengan en cuenta lo económico, lo social, lo productivo y el medio ambiente.

Este el trabajo se aportan aplicaciones a la planificación energética en asentamientos rurales asociada a la solución de modelos multicriteriales.

Como parte del trabajo se determinaron índices de consumo en el sector rural, factores de costo y eficiencias de algunas de las posibles tecnologías posibles a utilizar, criterios de selección de las alternativas energéticas, elementos que constituyen aportes del trabajo.

Los métodos propuestos para la selección de las alternativas energéticas permiten además un ordenamiento de las opciones para cada uso final de la energía. La comparación entre los dos métodos evidencia que en el caso de la Ponderación Lineal la ordenación se realiza sin constituir un proceso de optimización, Por otra parte, la Programación Lineal Multicriterio permite alcanzar soluciones de compromiso entre todos los objetivos y obtener una soluciones a estos problemas complejos.

La modelación matemática multiobjetivo y sus modelos de optimización permiten resolver los problemas socio – productivos incluyendo aspectos de la producción, los costos, las ganancias, la sociedad y el medio ambiente.

En el caso de estudio expuesto puede verse claramente como una solución multicriterial a un problema brinda una solución de compromiso que satisface los objetivos múltiples en vez de una solución que optimice todos los objetivos del problema.

En la Tabla comparativa entre los Modelos Unicriteriales y Multicriteriales del Caso de Estudio puede verse la tendencia del criterio económico (uniobjetivo) hacia el uso de combustibles tradicionales conllevando un mayor deterioro del Medio Ambiente.

De los resultados obtenidos se observa que la optimización multiobjetivo brinda mejores soluciones con respecto al medio ambiente y el desarrollo sostenible, evitándose la emisión al medio ambiente por año de 42 toneladas de CO_x , 943 kilogramos de SO_x y 180 kilogramos de NO_x , aumentando los costos

directos pero disminuyendo con creces los costos ambientales y sociales en la comunidad.

RECEIVED JULY, 2011

REVISED MAY, 2012

REFERENCES

- [1] BARBA-ROMERO, SERGIO. (1993): Evaluación Multicriterio de Proyectos de Ciencia y Tecnología. En **Estrategias, Planificación y Gestión de Ciencia y Tecnología**.297-318, Editorial Nueva Sociedad, Caracas .
- [2] BORROTO BERMÚDEZ, ANÍBAL J.(1997): **Planificación Energética en Asentamientos Rurales**. Coordinadora editorial Francisco Rojas González, Guadalajara.
- [3] Borroto Bermúdez, Aníbal J. (1997): . Métodos de Selección de Alternativas Energéticas en Asentamientos Rurales Ambientalmente Sostenibles. **I Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente**, Cienfuegos, Cuba.
- [4] CORTÉS, M. (2006): **Modelos Matemáticos Aplicados a la Administración y la Economía**. UNACAR, Colección Material Didáctico. Ciudad del Carmen.
- [5] Flament, Michel (1993): Evaluación Multicriterio de Proyectos de Inversión en Ciencia y Tecnología./ Michel Flament. En **Estrategias, Planificación y Gestión de Ciencia y Tecnología**.Editorial Nueva Sociedad, Caracas.
- [6] HOHMEYER, OLAV(1992):. Renewable and the Full Costs of Energy. **Energy Policy**, 20, 365-374.
- [7] LUENBERGER, D. G.y YE, Y(2008): . **Linear and Nonlinear Programming**, , Springer, Stanford.
- [8] MENDOZA, ALEJANDRO (1993): Evaluación Multicriterio de Proyectos de Ciencia Tecnología. En **Estrategias, Planificación y Gestión de Ciencia y Tecnología**.364-378. Editorial Nueva Sociedad, Caracas .
- [9] PASAYE, J. J. R.(2008): Valores y vectores propios.
<http://lc.fie.umich.mx/~jrincon/apuntes%20intro%20valores%20proprios.pdf>, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [10] RAMAKUMAR, R(1981): Renewable Energy Sources and Rural Development in Developing Countries. **IEEE Transactions on Education** , 24, 242-251.
- [11] RAMAKUMAR, R. A (1992): Knowledge-Based Approach to the Design of Integrated Renewable Energy Systems. Trabajo presentado en la **Reunión de Invierno de la IEEE**, New York.
- [12] RAMAKUMAR, R. A (1986): Linear Programming Approach to the Design of Integrated Renewable Energy Systems for Developing Countries. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, EC-1,18-24.
- [13] RAMAKUMAR, R.(1981): Renewable Energy Sources and Developing Countries. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** ,102, 502-509.
- [14] RAMANATHAN, R. (1993): A Multiobjective Programming Approach to Energy Resource Allocation Problems. **International Journal of Energy Research** , 17, 105-119.
- [13] SAATY, T.L A (1977): Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. **Journal of Mathematical Psychology**. 15, 234-281.