

MODELACIÓN Y SOCIEDAD

*Manuel E. Cortés Cortés**
*Aníbal E. Borroto Nordelo***

Fecha de recepción: 12 de febrero de 2008. Fecha de aceptación: 28 de julio de 2008.

Resumen

La modernidad conlleva varios retos: la competitividad, la productividad, el ahorro de recursos, las ganancias, el impacto en el ambiente y la utilización efectiva de recursos humanos, entre otros, que exigen en la empresa una toma de decisiones basada en los modelos estadísticos. En el presente trabajo se desarrolla el modelo matemático multicriterial para la selección de fuentes de energía para una población rural y se comparan resultados con modelos tradicionales de mejoramiento que persiguen un fin único. Entre los objetivos del modelo multicriterial planteado se encuentran los productivos, los económicos, los sociales y los ecológicos. Se presenta una aplicación de un modelo multicriterial en la selección de energía en un caso de estudio de una población rural real.

Palabras clave: modelación matemática, modelación multicriterial, selección de la energía, criterios ambientales y desarrollo social.



* Investigador-profesor en Ciencias de la Salud de la Universidad Autónoma del Carmen, Ciudad del Carmen. Campeche. Correo electrónico: mcortes@ucf.edu.cu.

** Investigador-profesor de la Facultad de Mecánica y del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, de la Universidad de Cienfuegos, Cuba. Correo electrónico: aborroto@fmec.ucf.edu.cu.

La dirección de la revista agradece especialmente a los dictaminadores las correcciones propuestas para mejorar la calidad y viabilidad del modelo econométrico presentado por el autor.

Abstract

Modernity involves many challenges: competitiveness, productivity, saving of resources, profits, environmental impact and the effective utilization of human resources, among others, which demand that company decision-taking be based on statistical models. In this study we develop the multicriterial mathematical model for selecting energy sources for a rural population and compare the results with traditional models of improvement that pursue a single goal. The multicriterial model includes productive, economic, social and ecological objectives. An application is presented of a multicriterial model in the selection of energy in a case study of a real rural population.

Key words: mathematical modeling, multicriterial modeling, energy selection, environmental and social development criteria.

Résumé

La modernité pose beaucoup de défis: la compétitivité, la productivité, l'économie de ressources, les bénéfices, l'impact sur l'environnement et l'utilisation effective des ressources humaines, entre autres, lesquels exigent au sein des entreprises, une prise de décision basée sur les modèles statistiques. Dans le présent travail est développé le modèle mathématique multicritère pour la sélection de sources d'énergie destinées à une localité rurale et les résultats sont comparés avec les modèles d'amélioration traditionnels qui poursuivent un but unique. Parmi les objectifs du modèle multicritère proposé se trouvent les critères productifs, économiques, sociaux et écologiques entre autres. il est présenté une application du modèle multicritère pour le choix d'énergie dans un cas d'étude d'une localité rurale réelle.

Mots clés: modélisation mathématique, modélisation multicritère, sélection de l'énergie, critères environnementaux et développement social.

Resumo

A modernidade traz muitos desafios: a competitividade, a produtividade, a economização de recursos, o lucro, o impacto no ambiente e o uso efetivo de recursos humanos, entre outros, que demandam na empresa uma toma de decisões baseadas nos modelos estatísticos. No presente trabalho desenvolve-se o modelo matemático multi-critério para a seleção de fontes de energia para uma população rural e comparam-se resultados com modelos tradicionais de melhoramento que buscam um fim único. Entre os objetivos do modelo multi-critério planejado estão os produtivos, os econômicos, os sociais e os ecológicos entre outros. Apresenta-se uma aplicação de um modelo multi-critério na seleção de energia num caso de estudo numa população real rural.

Palavras chave: modelação matemática, modelação multi-critério, seleção da energia, critérios ambientais e desenvolvimento social.

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 productiva, la distribución y el consumo de bienes y servicios (Martínez, Eduardo, 1994:100-101).

La globalización de la economía mundial se caracteriza por la utilización de las técnicas de mercadotecnia y la creciente competencia en los mercados que tienden a la búsqueda de tecnologías, una mayor utilización de los conocimientos científicos y la incorporación de sistemas productivos con menores costos, mayores ganancias y mejor utilización de los recursos, con una mayor productividad de las fuerzas de trabajo.

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 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.

En la economía de mercado los precios determinan la utilización de los recursos en la competencia, y tradicionalmente sólo se toman en cuenta —para fijar estos precios— los costos directos o internos de la producción de las empresas, pero existen otros de carácter externo de este proceso que no se reflejan en los precios de producción de bienes en el mercado, como es el caso de los impactos sociales y ambientales (Bundschuh, Jochen, 1996:120-121). Es decir, se fijan precios en el mercado que reflejan sólo los intereses de productores y consumidores directamente vinculados en el proceso productivo y no los de toda la sociedad en su conjunto.

En el ámbito mundial se manifiestan ciertas tendencias y políticas encaminadas a corregir este desbalance económico-ambiental mediante la incorporación de los costos externos, tanto al costo de los productos, con su consiguiente reflejo en los precios en el mercado, como al proceso de planificación energética, tendencia conocida como internalización de las externalidades. Este proceso implica en primer lugar el desarrollo de métodos de cuantificación de los costos externos y métodos multicriterio para la planificación a corto, mediano y largo plazos, y en segundo lugar la aplicación de políticas que lo impulsen.

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



que se fuera 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 sólo 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 análisis multicriteriales para la selección de opciones energéticas, donde además de considerar el factor económico se toman cuenta otros, como es el caso de los impactos sociales y ambientales.

El estudio social de la tecnología abarca hoy, por una parte, el impacto o la influencia de la tecnología, sobre la sociedad, y por otro, la configuración o influencia de la sociedad sobre la tecnología. Se afirma que la tecnología no sigue ni su propio ímpetu, ni la senda de la transformación racional de problemas, guiada por objetivos, sino que está configurada por factores sociales. La definición general de tecnología incorpora, además de los rasgos ya mencionados, los aspectos organizativos (actividad económica e industrial, actividad profesional, usuarios y consumidores) y los aspectos culturales (objetivos, valores y códigos, éticas, códigos de comportamiento). Los cambios técnicos pueden producir ajustes en los aspectos culturales y organizativos, del mismo modo que las innovaciones en la organización pueden conducir a cambios técnicos y culturales.

Todo lo anterior implica la evaluación y el análisis de políticas científico-tecnológicas que unidas a los valores morales, políticos, ambientales y sociales forman las regulaciones legislativas y políticas públicas.

El objetivo del presente trabajo es el de proporcionar un nuevo enfoque de la modelación matemática como herramienta de planificación energética, que al perseguir los objetivos tradicionales de mejoramiento, inserte otros nuevos objetivos relacionados para lograr la menor afectación al ambiente; de forma tal que se alcancen no sólo objetivos directos de la entidad que los aplica, sino indirectos de la sociedad.

Desarrollo

La matemática como ciencia es una de las formas de la conciencia social de los hombres. Así, a pesar de su conocida singularidad cuantitativa, las leyes que rigen su desarrollo, en lo fundamental, son las generales para todas las formas de la conciencia social.

La matemática, al igual que la ciencia, puede dividirse en dos ramas: matemáticas puras y matemática aplicada. Se plantea que ningún Estado moderno y con confianza en el progreso puede construirse sin una referencia explícita a la ciencia en general

y a las matemáticas en particular; se dice además que si hubo un tiempo en que toda persona debía saber latín, entonces llegará el tiempo no muy lejano en que toda persona culta deba saber matemáticas.

La matemática aplicada ha sido históricamente una herramienta necesaria utilizada en el desarrollo social, las actividades productivas, la investigación científica y la vida en general. Una comprensión objetiva de las matemáticas es una condición necesaria para la ubicación de esta ciencia en la actividad productiva y social de los hombres, podemos decir que es una condición del desarrollo.

En la matemática aplicada tradicional, en los llamados métodos de *optimización*, se llega a la programación lineal formulada finalmente por G. B. Dantzig, como resultado del desarrollo científico desde Newton, Leibniz, Lagrange, así como V. Kantarovitch, G. Stigler y otros autores más modernos. Se formula el problema de programación lineal como el conjunto de valores que toman las variables de decisión, que satisfagan una serie de restricciones o limitaciones lineales y aumenten o disminuyan una función lineal.

En estos modelos las restricciones representaban recursos que se limitaban en el proceso productivo y las funciones objetivas más utilizadas se correspondían con el aumento de la producción, las ganancias o la reducción de los costos. No se tenían aquí aquellos objetivos ecológicos como el agotamiento de los recursos materiales, las emanaciones que el proceso de producción emite a la atmósfera o el impacto ambiental, por sólo citar algunos, entrando en contradicción con la tendencia en el ámbito mundial de emprender acciones encaminadas a la preservación del ambiente para el logro de un desarrollo sostenible.

El planeta podría asimilar el impacto de las políticas irracionales con la producción; es posible que lo absorba y continúe su proceso evolutivo, pero la vida, en esencia la especie humana, no podrá soportar esos cambios, porque es la que se encuentra en mayor peligro de extinción.

Por otra parte la sociedad la forma un conjunto numeroso de factores, entre ellos el ambiente, las empresas y los trabajadores. Existe una paradoja (productiva-ambiental), puesto que las empresas en su beneficio producen de manera incontrolada, buscando supuestamente un desarrollo social, pero a su vez van deteriorando al medio y con ello a la sociedad que a la larga producirá una catástrofe social.

Entre los llamados costos directos pueden encontrarse los del proyecto, las tecnologías, el transporte, los recursos, la producción, los impuestos, la mano de obra, los intereses. Mientras que los costos externos, ecológicos o sociales, cuentan con el "importe" sobre la salud humana, los daños al 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 (Hohmeyer, Olev, 1992:365-374).

Los tipos de impactos ambientales (Evans, Gerald, 1984:1001-1004) pueden enumerarse:

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.

Y surge la pregunta: ¿se deben resolver los problemas creados por la tecnología con más tecnología?

La programación lineal presentaba las características de relaciones lineales entre las variables y de función objetivo única. Surge así la modelación multicriterial o programación lineal multiobjetivo, desarrollada en la década de los sesenta. Entre los métodos iniciales se estudiaron la selección del criterio más importante, el método de la función ponderada, el método de los pasos sucesivos, la *optimización* de Pareto, el modelo de programación por meta (Goal programming model) y otros.

Estos modelos de matemática aplicada menos tradicionales surgen como vías para resolver los problemas de planificación de forma tal que se puedan realizar análisis más integradores con múltiples objetivos (Cortés, M., 1999:20-22).

Según la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de 1987 (Martínez, Eduardo, 1994:100-101), se define como *desarrollo sustentable* aquel que cubra las necesidades del presente sin limitar las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer las suyas, esto implica necesariamente el cuidado y preservación de nuestro entorno si se quiere un futuro promisorio para la humanidad.

Según los Criterios y Valores de la Tecnología (*Cuadernos de Sección*, 1995: 298-200), persiguen los siguientes objetivos:

Objetivos económicos	
Practicabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Utilidad • Factibilidad • Eficacia
Costo-eficacia	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de costos • Ganancias

Objetivos Sociales

Prosperidad	<ul style="list-style-type: none"> • Crecimiento (cuantitativo y cualitativo) • Competitividad internacional • Pleno empleo • Imparcialidad distributiva
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de riesgos para la vida

Objetivos ecológicos

Calidad ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento del equilibrio tecnológico • Protección del paisaje • Utilización económica de los recursos • Reducción de emisiones e inhalaciones
-------------------	--



El problema de la decisión multicriterios (Hamilton, E, 1989:376-379) mejora varias funciones objetivos simultáneas y cuentan con:

1. Un conjunto de opciones estables
2. Un conjunto de criterios de evaluación de cada opción
3. Una matriz de decisión o impactos
4. Una metodología o modelo de agregación de preferencias
5. Un proceso de decisión (por parte de un experto)

Para la solución de los modelos multiobjetivos o multicriteriales hay varios métodos, entre los cuales se pueden nombrar (Cortés, Manuel, 1999:20-22) la *optimización* de Pareto, el método simplex multicriterio y la programación por metas, entre otros.

En seguida trataremos la programación por metas, por ser uno de los métodos más utilizados.

Modelo de programación por meta [Goal Programming Model] (Cortés, Manuel, 2005:50-52)

Se tiene el siguiente problema de P. L. multiobjetivo:

- Función objetivo 1: $Z_1 = \text{mín o máx} \sum_{i=1}^n C1_i \cdot X_i$
- Función objetivo 2: $Z_2 = \text{mín o máx} \sum_{i=1}^n C2_i \cdot X_i$

• Función objetivo k: $Z_3 = \text{mín o máx} \sum_{i=1}^n Ck_i \cdot X_i$

$$X_i > 0 \quad i = 1, n$$

Sujeto a las restricciones siguientes:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot X_i \{ <, =, > \} B_j \quad j = 1, m$$

Pasos para la solución, según Cortés, Manuel (2005:50-52):

- 1) Se resuelve el problema de P. L. mono objetivo con cada una de las k funciones objetivos y se tiene la siguiente notación:

j = objetivos

b_j = meta para el objetivo j

d_j^- = variable desviacional que representa la subevaluación del objetivo j

d_j^+ = variable desviacional que representa la sobreevaluación del objetivo j

w_j = factor de peso para las variables desviacionales del objetivo j

$$w_j = b_j - L_j$$

X_i = Variable de decisión i

Donde: L_j

- peor valor para el objetivo j
- mínimo valor posible para el objetivo j en objetivos de aumento
- máximo valor posible para el objetivo j en objetivos de reducción

El valor de L_j se obtiene a partir de los análisis de sensibilidad de los coeficientes de las funciones objetivos.

El resultado de las variables del modelo pueden expresarse en forma de cuadro como:

Objetivo	Óptimo o meta	Peor valor	Factor de peso
j	b_j	L_j	w_j

- 2) Se convierte el problema anterior (k problemas individuales de P. L.) en un problema mono objetivo como sigue:

$$\text{Función objetivo} = \text{mín} \sum_{j=1}^k P_j (d_j^- + d_j^+) \quad (1)$$

Donde:

k- Número de objetivos

P_i- Niveles de prioridad: se introducen para establecer la importancia relativa de cada criterio, al establecer por tanto un orden de prioridad en el mejoramiento; se utilizan también para establecer la verdadera relación entre las dimensiones de las variables desviacionales.

Sujeto a las restricciones:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n C_{1i} \cdot X_i + w_1 \cdot d_1^- - w_1 \cdot d_1^+ &= b_1 \\ \sum_{i=1}^n C_{2i} \cdot X_i + w_2 \cdot d_2^- - w_2 \cdot d_2^+ &= b_2 \\ \sum_{i=1}^n C_{ki} \cdot X_i + w_k \cdot d_k^- - w_k \cdot d_k^+ &= b_k \\ \text{sujeto a } \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot X_i \{ <, =, > \} B_j \quad j &= 1, m \end{aligned}$$



Las nuevas restricciones consideradas surgen por incrementar una restricción por cada función objetivo del problema de multiobjetividad.

$$X_i, d_j^+, d_j^- \geq 0$$

En los modelos con metas múltiples pueden utilizarse los siguientes casos:

1. Modelos con metas múltiples sin prioridades
2. Modelos con metas múltiples con prioridades
3. Modelos con metas múltiples con prioridades y ponderaciones

En general, los modelos multicriterios proporcionan una solución que “satisface” los objetivos múltiples en vez de una solución que mejore todos los objetivos. La programación por metas maneja los objetivos (metas) como restricciones y utiliza (en la función objetivo) un sistema de prioridades para satisfacerlas (Hillier, Frederick, 1991: 285-290), lo que permite obtener una solución “óptima global”.

Caso de estudio

A continuación se exponen los resultados de un caso de estudio para la selección de opciones energéticas (planificación energética) en un proyecto de comunidad rural

ambientalmente sostenible ubicada en las áreas cañeras de una central azucarera, en un municipio de la provincia de Cienfuegos, Cuba, donde se aplicó el modelo multicriterial, específicamente la programación por metas.

Planteamiento del problema (caso de estudio)

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.

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.

En zonas rurales, la energía se emplea para cubrir las necesidades del ambiente doméstico, de la producción agrícola, y para establecer y operar pequeñas industrias (*Cuadernos de Sección*, 1995:298-200). A partir de la calidad de la energía requerida, las demandas energéticas de una comunidad rural se pueden clasificar en:

- Energía térmica de bajo potencial (menos de 100 °C): calentamiento de agua, secado de productos, calefacción.
- Energía térmica de medio potencial (entre 100 y 300 °C): cocción de alimentos.
- Electricidad y potencia mecánica o energía de alto potencial: iluminación, electrodomésticos, bombeo de agua, comunicaciones, accionamientos en pequeñas industrias.

Los usos finales de la energía necesarios en la comunidad son cocción de alimentos, bombeo de agua, iluminación, aplicaciones eléctricas y servicio de agua caliente; los recursos con los que se podía contar para satisfacer dichos usos son queroseno, diesel, gas licuado, carbón vegetal, biogás, leña, briquetas de paja de caña, energía solar térmica, energía solar fotovoltaica, energía eólica, hidroelectricidad, electricidad de la red y electricidad generada con diesel. Con estos elementos puede conformarse una matriz de recursos —usos finales o matriz de decisión, la cual se muestra en el cuadro 1—. Como puede observarse resultaron 32 combinaciones posibles que representarían variables de decisión del problema planteado.

Cuadro 1
Posibles combinaciones recurso-uso final

<i>Recursos</i>	<i>Usos finales</i>				
	<i>Cocción de alimentos</i>	<i>Bombeo de agua</i>	<i>Iluminación</i>	<i>Aplicaciones eléctricas</i>	<i>Servicio de agua caliente</i>
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					



Los objetivos del modelo multicriterial propuesto son los siguientes:

1. Reducir los costos directos
2. Reducir la eficiencia del sistema
3. Reducir el uso de derivados del petróleo
4. Reducir emisión de CO_x al medio
5. Reducir emisión de SO_x al medio
6. Reducir emisión de NO_x al medio
7. Aumentar 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 que se muestran a continuación:

Las restricciones del problema para:

- 1) Garantizar la energía anual necesaria para la cocción de alimentos. Con un valor calculado de 404,106 kWh/año.
- 2) Garantizar la energía anual necesaria para el bombeo de agua. Con un valor calculado de 2,506 kWh/año.
- 3) Garantizar la energía anual necesaria para la iluminación. Con un valor calculado de 4,320 kWh/año.
- 4) Garantizar la energía anual necesaria para otras aplicaciones eléctricas. Con un valor calculado de 15,308 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, siete variables de holgura, 14 restricciones, de ellas siete restricciones de meta y las siete restantes del sistema y una función objetivo multicriterial.

Para el modelo, según los expertos consultados, se establecieron las

- Prioridad 1, objetivos 1, 4, 5 y 6
- Prioridad 2, objetivos 3 y 7
- Prioridad 3, objetivo 2

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

Los resultados obtenidos se muestran en los cuadros 2 y 3.

Cuadro 2
Fuentes seleccionadas en la optimización multiobjetivo

Usos finales		Fuentes seleccionadas y resultados de las variables (x_i , kW/h / 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)

Cuadro 3
Valores de las funciones objetivos

<i>Función objetivo</i>	<i>Optimización Monoobjetivo (costos)</i>	<i>Optimización Multiobjetivo</i>
Z ₁ - Costos totales, dólares / año	8,530.241	13,756.69
Z ₂ - Consumo energía primaria, kW/h / año	668,494.31	773,324.39
Z ₃ - Energía derivados petróleo, kW/h / año	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, kW/h / año	39,425	39,425
Valor de la función objetivo global (expresión 1)	154.84	



Como se puede apreciar en los resultados que arroja el cuadro 2, al incluir los criterios 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 sólo el criterio económico, lógicamente la solución se desplazará hacia el uso de los combustibles tradicionales que posibilitan lograr mejores indicadores económicos.

En el cuadro 3 se realiza una comparación de ciertos indicadores importantes de la *optimización* multiobjetivo, teniendo en cuenta sólo el criterio económico. En dicho cuadro se puede observar que la *optimización* multiobjetivo arroja resultados mucho más compatibles con el ambiente y acordes con los principios del desarrollo sostenible; en este sentido se observa que con esta solución se evita al año la emisión al ambiente de 42 toneladas de CO_x, de 943 kilogramos de SO_x y de 180 kilogramos de NO_x.

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.

Conclusiones

- La modelación matemática uniobjetivo por lo general ha sido empleada por el hombre para hacer costos óptimos, ganancias o producción, sin objetivos de índole ecológicos que mejoren el ambiente y sin favorecer el desarrollo sustentable.
- Existe una paradoja entre la producción de las empresas —ya que buscan supuestamente un desarrollo social— y el deterioro ambiental que conlleva.
- La modelación matemática multiobjetivo y sus modelos de mejoramiento permiten resolver los problemas socioproductivos, incluyendo aspectos de la producción, los costos, las ganancias, la sociedad y el ambiente.
- En el caso de estudio expuesto puede verse claramente cómo una solución multicriterial a un problema brinda una solución de compromiso que satisface los objetivos múltiples en vez de una solución que haga óptimos todos los objetivos del problema.
- En el cuadro comparativo entre los modelos unicriteriales y multicriteriales del caso de estudio puede verse la tendencia del criterio económico (uniobjetivo) hacia el uso de combustibles tradicionales, lo que genera un mayor deterioro del ambiente.
- De los resultados obtenidos se observa que la *optimización* multiobjetivo brinda mejores soluciones con respecto al ambiente y al desarrollo sostenible, con lo que se evita cada año la emisión al medio de 42 toneladas de CO_x , de 943 kilogramos de SO_x y de 180 kilogramos de NO_x , lo que aumenta los costos directos pero disminuye con creces los costos ambientales y sociales en la comunidad.
- El modelo matemático multicriterial aplicado al caso de estudio y los resultados obtenidos por los paquetes de programas Storm y WinQsb, respectivamente, fueron utilizados para seleccionar las fuentes energéticas en la comunidad estudiada con óptimos valores ambientales, ahorro de energía de la fuente y un adecuado costo total.



Bibliografía

- Anderson, R., *Introducción a los métodos cuantitativos para la administración*, México, Iberoamérica, 1995.
- , *An Introduction to Management Science Quantitative Approaches to Decision Making*, 4a edición, EU, West Publishing Co, 1985.
- Aquilano C., *Dirección y Administración de la producción y las operaciones*, México, McGraw Hill, 1995.
- Bundschuh, Jochen, *La responsabilidad de las universidades en la educación ambiental y sus posibilidades; ejemplo: contaminación y protección de los recursos hídricos. Educación Superior, Siglo XXI. Conferencia Regional sobre Políticas y Estrategias para la Transformación de la Educación Superior en América Latina y el Caribe*, La Habana, 1996, pp. 1-8.
- Cortés, M., *Introducción a la Investigación de Operaciones*, Guayaquil, Universidad de Guayaquil, 1999.
- , Miranda, R., Sánchez T., Curbeira D., *Aplicaciones de la modelación matemática a la administración y la economía*, Campeche, Universidad Autónoma del Carmen, 2005.
- Cuadernos de Sección, Sociedad, Ciencia y Tecnología 2*, "Riesgos y beneficios sociales del desarrollo tecnológico", Donosita, Sociedad de Estudios Vascos, 1995, 300 pp.
- Davis, K. Roscoe; Mckewon, P. G., *Modelos Cuantitativos para Administración*, México, Iberoamérica, 1986, 758 pp.
- Evans, Gerald W., *An Overview of Techniques for solving multiobjective Mathematical Program Management Science* (USA): 30, (11): November, 1984, 1268-1282 pp.
- González G. Marta, "Ciencia Tecnología y Sociedad. Una nueva Introducción al Estudio Social de la Ciencia y la Tecnología", en *Tecnos*, Madrid, 1996, 324 pp.
- Hamilton, E; Dale, A; Chaudrashekhar, M; Kamlesh, A., *Storm. Quantitative Modelling for Decision Support*", Oakland, Holden-Day, 1989, 450 pp.
- Hillier, F; Lieberman, G., *Introducción a la Investigación de Operaciones*, México, McGraw-Hill, 1991, 995 pp.
- Hohmeyer, Olev, "Renewable and the Full Costs of Energy". *Energy Policy*, EU, 20 (4), abril, 1992, pp. 365-374.
- Kaufmann, Arnold, *Métodos y modelos de la investigación de operaciones*, La Habana, Pueblo y Educación, 1981, 570 pp.
- Martínez, Eduardo, *Ciencia, tecnología y desarrollo: interrelaciones teóricas y metodológicas*, Venezuela, Nueva Sociedad, 1994, 512 pp.
- Mathur, K., *Investigación de Operaciones. El arte de la toma de decisiones*, México, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1996.
- Grupo de Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnología, *Problemas Sociales de la Ciencia y la Tecnología*, Habana: Editorial Félix Varela, 1994, 279 pp.
- Ramanathan, R. A., *Multiobjective Programming Approach Energy Resource Allocation Problems*, International Journal of Energy Research, EU, 1 (17). 1993, 105-119 pp.
- Taha, Hamdy A., *Investigación de operaciones*, 2a. ed., México, Alfromegu, 1991, 989 pp.
- Thierauf, R, Grosse, R. A., *Toma de decisiones por medio de la investigación de operaciones*, México, Limusa Noriega, 1993, 450 pp.
- Trujillo, José M. y José A. Díaz, *Métodos Económico - Matemáticos I*, tomo 1, La Habana, ENPES, 1988, 339 pp.
- Watson, Gallagher, *Métodos cuantitativos para la toma de decisiones en administración*, México, McGraw-Hill, 1982, 612 pp.
- Wise News Communiqué, *Energy and Power; Alternative energy and its implications*, edición especial, EU, 427-428, marzo, 1995, 28 pp.
- Winston, Wayne L. *Investigación de Operaciones: Aplicaciones y Algoritmos*, México, Iberoamericana, 1994, 1337 pp.

