

# MODELACION MULTICRITERIAL Y MEDIO AMBIENTE

Manuel E. Cortés Cortés\* y Anibal E. Borroto Nordelo\*\*

\* Facultad de Informática, Universidad de Cienfuegos.

\*\* Facultad de Mecánica. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos.

## RESUMEN

En la vida moderna, la competitividad, el desarrollo de la producción y las ganancias hacen posible cada día que una empresa utilice las mejores decisiones mediante la estadística, la modelación matemática y la computación, tomando en consideración el medio ambiente y sus relaciones con la producción.

En el presente trabajo se desarrolla un nuevo alcance de la modelación multicriterial siguiendo los objetivos tradicionales de la optimización de la producción, las ganancias, los costos y otros entre los cuales podrían incluirse nuevos objetivos económicos, sociales y ecológicos en forma que ellos no solamente alcancen objetivos directos en la entidad sino otros indirectos para la sociedad. Se presenta una aplicación de la modelación multicriterial en la selección de energía en una población rural.

## ABSTRACT

In the modern life, competence, productive development and profitability make possible every day for an enterprise to look for the best decision takings by means of statistics, mathematical modeling and computation taking into account environment and its relationship with production.

In this paper it is shown a new scope of mathematical modeling and the multiobjective optimization for satisfying production problems and contributing to the environment and society as a whole.

Its objective is to give a new scope of multicriteria modeling following traditional objectives of production optimization, profits, costs and others which would include new economic, social and ecological objectives in a way that they not only reach direct objectives in the entity but indirect ones for society. Is given an application of the multicriterial modeling in selected energy in a rural population.

**KEY WORDS:** Goal programming, energy selection, decision making

MSC 90B50

## 1 INTRODUCCION

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 Bundschuh (1996). 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. Por otra parte, estos costos externos no son ficticios pues generalmente estos son pagados por terceras partes no vinculadas al proceso productivo causante de los mismos, tal es el caso por ejemplo de las afectaciones económicas que puede sufrir un agricultor por lluvias ácidas causadas por la emisión de CO<sub>2</sub> al medio por procesos productivos ajenos a su voluntad. A nivel 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 Wise. Special Edition (1995) . 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 plazo, y en segundo lugar la implementación de políticas que lo impulsen.

El objetivo del presente trabajo es el de proporcionar un nuevo enfoque de la modelación matemática como herramienta de planificación energética, que persiguiendo los criterios tradicionales de optimización, inserte nuevos criterios relacionados con lograr la menor afectación al medio ambiente; de forma tal que se alcancen no solo criterios directos de la entidad que los aplique, sino criterios indirectos de la sociedad.

## 2 DESARROLLO

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 correcta comprensión materialista del objeto 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.

Los métodos de la optimización por su parte han sido explotados en un gran número de aplicaciones, donde generalmente se persigue la obtención de un criterio único, sujeto a una serie de limitaciones o restricciones; ese criterio único generalmente se corresponde con la maximización de la producción, las utilidades y la minimización de los costos, por citar los más universalmente utilizados [6]. No se tienen en cuenta aquí aquellos objetivos ecológicos como son: el agotamiento de los recursos materiales, las emanaciones que el proceso de producción emite a la atmósfera, el impacto ambiental [8], por sólo citar algunos; lo cual entra en contradicción con la tendencia a

nivel mundial de emprender acciones encaminadas a la preservación del medio ambiente para el logro de un desarrollo sostenible o sustentable. Según González G. Marta.( 1996) la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de 1987 se define como desarrollo sustentable aquel que satisfaga 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 [3], los Criterios y Valores de la Tecnología persiguen los siguientes criterios:

- Criterios económicos

- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| Practicabilidad | - utilidad            |
|                 | - factibilidad        |
|                 | - eficacia            |
| Costo-eficacia  | - reducción de costos |
|                 | - ganancias           |

- Criterios Sociales

- |              |                                            |
|--------------|--------------------------------------------|
| Prosperidad: | - crecimiento (cuantitativo y cualitativo) |
|              | - competitividad internacional             |
|              | - pleno empleo                             |
|              | - imparcialidad distributiva               |
| Seguridad:   | - reducción de riesgos para la vida        |

- Criterios ecológicos

- |                    |                                            |
|--------------------|--------------------------------------------|
| Calidad ambiental: | - mantenimiento del equilibrio tecnológico |
|                    | - protección del paisaje                   |
|                    | - utilización económica de los recursos    |
|                    | - reducción de emisiones e inhalaciones    |

La modelación multicriterial, desarrollada en la década del 60, es una de las vías para resolver los problemas de planificación de forma tal de cumplir con todos los objetivos anteriormente planteados; surge por la necesidad de realizar análisis más integradores, donde se incluyeran múltiples criterios como pudieran ser los ya enumerados en la optimización unicriterial y otros nuevos de corte ambientales y sociales [10].

El problema de la decisión multicriterio es el de una optimización con varias funciones objetivos simultáneas y un único agente decisor [9], para esto existen varios métodos: Optimización de Pareto, Método Simplex Multicriterio, Programación por Metas, entre otros.

Se presenta a continuación un caso de estudio que será analizado por la Programación por Metas por ser un modelo multicriterial muy utilizado.

**Caso Estudio:** Modelo para la selección óptima de alternativas energéticas (planificación energética) en un proyecto de comunidad rural ambientalmente sostenible ubicada en las áreas cañeras del Central Azucarero “Guillermo Moncada”, municipio de Abreus, Provincia de Cienfuegos, Cuba.

La comunidad comprende 30 viviendas, con una población total estimada de 120-200 personas y un área de 9 000 m<sup>2</sup>, 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.

Los usos finales de la energía necesarios en la comunidad son: cocción de alimentos, bombeo de agua, iluminación, aplicaciones eléctricas, servicio de agua caliente; y los recursos con 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 la tabla 1. Como puede observarse resultaron 32 combinaciones posibles.

### 3. MODELO DE PROGRAMACIÓN POR META. [GOAL PROGRAMMING MODEL] [1]

Este método requiere de un primer paso que consiste en resolver el problema, de forma independiente, para cada uno de los criterios (modelo unicriterial), obteniendo metas o valores óptimos.

Los criterios del modelo multicriterial propuesto son los siguientes:

- 1- Minimizar los costos directos.

- 2- Maximizar la eficiencia del sistema.
- 3- Minimizar el uso de derivados del petróleo.
- 4- Minimizar emisión de CO<sub>x</sub> al medio.
- 5- Minimizar emisión de SO<sub>x</sub> al medio.
- 6- Minimizar emisión de NO<sub>x</sub> al medio.
- 7- Maximizar el uso de fuentes locales y derivados de la biomasa cañera.

Tabla 1- Posibles combinaciones recurso - uso final.

RECURSOS	USOS FINALES					
	Cocción de alimentos	Bombeo de agua	Iluminación	Aplicaciones 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.

Posteriormente se conforma un problema modificado con una función objetivo que minimiza las desviaciones de las metas obtenidas, y que puede ser solucionado por Programación Lineal.

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

k- Número de criterios.

P<sub>j</sub>- Niveles de prioridad: Para este caso se establecen tres niveles: P<sub>1</sub> (Criterios 1, 4, 5 y 6); P<sub>2</sub> (Criterios 3 y 7); P<sub>3</sub> (Criterios 2); donde  $P_i = 10^{3-i}$

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

**-Restricciones:**

$$\sum_{i=1}^{32} C_i \cdot X_i + w_1 \cdot d_1^- - w_1 \cdot d_1^+ = b_1$$

$$\sum_{i=1}^{32} \frac{X_i}{E_{gi}} + w_2 \cdot d_2^- - w_2 \cdot d_2^+ = b_2$$

$$\sum X_i + w_3 \cdot d_3^- - w_3 \cdot d_3^+ = b_3 \quad i = 1, 2, 10, 11, 12, 17, 17', 18, 22, 23, 27, 28, 31, 32.$$

$$\sum_{i=1}^{32} e_{1i} \cdot X_i + w_4 \cdot d_4^- - w_4 \cdot d_4^+ = b_4$$

$$\sum_{i=1}^{32} e_{2i} \cdot X_i + w_5 \cdot d_5^- - w_5 \cdot d_5^+ = b_5$$

$$\sum_{i=1}^{32} e_{3i} \cdot X_i + w_6 \cdot d_6^- - w_6 \cdot d_6^+ = b_6$$

$$\sum X_i + w_7 \cdot d_7^- - w_7 \cdot d_7^+ = b_7 \quad i = 4, 6$$

Donde:

$X_i$  = variable principal del problema, pudiera definirse como la energía útil aportada por la combinación "i" recurso - uso final,  $kWh/año$ .

$C_i$  = Coeficiente de costo,  $\$/kWh$  (tabla 3 [7])

$n$  = Número de combinaciones recurso - uso final.

$E_{gi}$  = Eficiencia global de la combinación "i" ( tabla 4 [7] )

$e_{1i}$  = Coeficiente de emisiones,  $kg CO_x/kWh$  .

$$e_{1i} = \frac{3.6 \cdot M_c}{V_c} \times \frac{\mu_{CO_x}}{\mu_c} \times \frac{1}{E_g}$$

$M_c$ - Masa de carbono por kg de combustible,  $kg C/kg$  comb.

$V_c$ - Valor calórico del combustible,  $MJ/kg$  comb.

$\mu_{CO_x}$ - Masa molecular del  $CO_x$ .

$\mu_c$ - Masa molecular del carbono.

$E_g$ - Eficiencia global o del sistema.

$e_{2i}$  = Coeficiente de emisiones,  $kg SO_x/kWh$ .

$$e_{2i} = \frac{3.6 \cdot M_s}{V_c} \times \frac{\mu_{SO_x}}{\mu_s} \times \frac{1}{E_g}$$

$M_s$ - Masa de azufre por kg de combustible,  $kg S/kg$  comb.

$\mu_{SO_x}$ - Masa molecular del  $SO_x$ .

$\mu_s$ - Masa molecular del azufre.

$e_{3i}$  = Coeficiente de emisiones,  $kg NO_x/kWh$  .

$$e_{3i} = \frac{3.6 \cdot M_n}{V_c} \times \frac{1}{E_g}$$

$M_n$ - Masa de  $NO_x$  por kg de combustible.

\*\*\*\*  $j$  = Criterios.  $j = 1..k$

$b_j$  = Meta para el criterio  $j$ .

$d_j^-$  = Variable desviacional que representa la sub-evaluación del criterio  $j$ .

$d_j^+$  = Variable desviacional que representa la sobre-evaluación del criterio  $j$ .

$w_j$  = Factor de peso para las variables desviacionales del criterio  $j$  se introduce para disminuir los errores por sensibilidad.

$$w_j = b_j - L_j$$

$L_j$  -peor valor para el criterio  $j$ .

En general los modelos multicriterios proporcionan una solución que "satisface" los criterios múltiples en vez de una

solución que “optimice” todos los criterios. La Programación por Metas, maneja los criterios (metas) como restricciones y utiliza (en la función objetivo) un sistema de prioridades para satisfacerlas [4], permitiendo obtener una solución “óptima global”.

Los resultados obtenidos de la corrida del modelo planteado en el paquete de programas STORM se muestran en las tablas 2 y 3.

Tabla 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)

Tabla 3- Comparación entre la Modelación Unicriterial y la Multicriterial.

Función Objetivo	Optimización Unicriterial (costos)	Optimización Multicriterial
$Z_1$ - Costos totales, USD / 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 COx, Kg / año	45 557.6	3 102.49
$Z_5$ - Emisiones SOx, Kg / año	1 201.64	258.50
$Z_6$ - Emisiones NOx, Kg / año	193.36	13
$Z_7$ - Energía fuentes locales, kW/h / año	39 425	39425
Valor de la función objetivo global (expresión1)	154.84	

Como se puede apreciar en los resultados resumidos en la tabla 2, 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 (objetivo del modelo unicriterial). En la tabla 3 se realiza una comparación de algunos indicadores importantes de la optimización multicriterial, con respecto a una optimización teniendo en cuenta solo el criterio económico. Se puede observar la superioridad de la optimización multiobjetivo que arroja resultados mucho más compatibles con el medio ambiente y acordes con los principios del desarrollo sostenible; evitando la emisión al medio ambiente por año de 42 toneladas de CO<sub>x</sub>, 943 kilogramos de SO<sub>x</sub> y 180 kilogramos de NO<sub>x</sub>. 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 multicriterial la solución estaría entre las dos variantes analizadas, lo cual se acercaría más a las condiciones reales de nuestros países.

#### 4 CONCLUSIONES

La matemática ha sido históricamente una herramienta necesaria utilizada en el desarrollo social, las actividades productivas, la investigación científica y la vida en general.

La optimización uniobjetivo generalmente ha tratado de optimizar los costos, las ganancias, o la producción, no teniendo en cuenta objetivos de índole ecológicas que afecten el medio ambiente, luego no favorecen un desarrollo sustentable.

La modelación matemática multicriterial está llamada a resolver los problema productivo-ambiental al incluir objetivos múltiples en los que se consideren no sólo los objetivos clásicos (producción, costos, ganancias, ..... ) sino también los objetivos de índole social y ambiental.

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.

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<sub>x</sub>, 943 kilogramos de SO<sub>x</sub> y 180 kilogramos de NO<sub>x</sub>, aumentando los costos directos pero disminuyendo con creces los costos ambientales y sociales en la comunidad.

El modelo matemático multicriterial aplicado y los resultados obtenidos por el paquete de programas STORM fueron

utilizados para seleccionar las fuentes energéticas en la Comunidad estudiada con óptimos valores medioambientales, ahorro de energía de la fuente y adecuado costo total.

Received May, 2006  
Revised June, 2007

## REFERENCIAS

- [1] CORTÉS, M., MIRANDA, R., SÁNCHEZ T., y CURBEIRA D.(2005): **Aplicaciones de la Modelación Matemática a la Administración y la Economía**. Universidad Autónoma del Carmen. Mérida. México.
- [2] BUNDSCHUH, J. (1996.). 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 Estratégicas para la Transformación de la Educación Superior en América Latina y el Caribe**. ( La Habana ), 1-8,
- [3] CUADERNOS DE SECCIÓN. SOCIEDAD, CIENCIA Y TECNOLOGÍA 2.(1995): **Riesgos y beneficios sociales del desarrollo tecnológico**.-Sociedad de Estudios Vascos, Donostia. .
- [4] EVANS, G. W. (1984): An Overview of Techniques for solving multiobjective Mathematical Program **Management Science** . 30, 1268 1282..
- [4] GONZÁLEZ, M., J. A. LÓPEZ y J. L. LUJAN.( 1996) **Ciencia Tecnología y Sociedad. Una nueva Introducción al Estudio Social de la Ciencia y la Tecnología**. Tecnos, Madrid.
- [5] HILLIER, F; y LIEBERMAN, G. (1991): **Introducción a la Investigación de Operaciones**. Mc Graw Hill, Mexico.
- [6] HOHMEYER, O. (1992):. Renewable and the Full Costs of Energy. **Energy Policy**, 20, 365-374 p.
- [7] MARTÍNEZ, E.(1994):. **Ciencia, Tecnología y Desarrollo: interrelaciones teóricas y metodológicas** Nueva Sociedad, Caracas.
- [8] RAMANATHAN, R.A. (1993): Multiobjctive Programming Approach Energy Resource Allocation Problems. **International Journal of Energy Research** 1, 105-119 .
- [9] THIERAUF, R, GROSSE, R.A. (1993): **Toma de Decisiones por Medio de la nvestigación de Operaciones**. Limusa Noriega, Mexico.
- [10] WISE. SPECIAL EDITION (. 1995). **Energy and Power, Alternative energy and its implications**. Wise News Communiqué :March, 427-428.