

Modelado matemático para la selección óptima de instalaciones energéticas y su esquema de solución

Mathematical modeling for optimal selection of energetic installations and its solution scheme

Valente Ribeiro-Muhongo^I, José Arzola-Ruiz^{II,*}, Luis Enrique Garcia-Marrero^{III},
Deny Oliva-Merencio^{IV}

I. Universidad Katyavala Bwila. Benguela, Angola

II. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. Centro de Estudios de Matemática para las Ciencias Técnicas, CEMAT. La Habana, Cuba

III. Universidad de Holguín Oscar Lucero Moya. Centro de Estudios CAD/CAM. Holguín, Cuba

IV. Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudio de Tecnologías de Energía Renovable, CETER. La Habana, Cuba

*Autor de correspondencia: jarzola@cemat.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional](#)



Recibido: 27 de octubre de 2018

Aceptado: 30 de noviembre de 2018

Resumen

El objetivo del trabajo consistió en seleccionar el equipamiento requerido, entre los disponibles, para satisfacer la demanda energética de un territorio y sus zonas, esto permitió optimizar un compromiso entre los costos de inversión, operación y las emisiones contaminantes a la atmósfera. Para la solución del problema se aplicó un esquema de descomposición en sub-tareas de optimización bajo criterios múltiples en una tarea de Programación Lineal en el nivel superior y varias de Programación en Enteros en el nivel inferior, las que se solucionaron por una heurística propia del método de

Integración de Variables. Se solucionó la tarea formulada para los datos reales del municipio de Ganda, Benguela, Angola, con la determinación de cuáles instalaciones básicas, entre las disponibles, se deben adquirir y en cuales zonas del territorio se debe montar cada instalación. Quedó demostrado que los problemas de selección óptima del equipamiento energético en regiones aisladas pueden ser solucionado mediante los métodos empleados.

Palabras claves: sistemas de ingeniería, energización de territorios, selección de instalaciones energéticas.

Abstract

The objective of this work was to select the required equipment among the set of available, to satisfy the energy demand of a territory, optimizing a commitment between investment and operation costs and polluting to the atmosphere emissions. For the solution of the problem, a decomposition scheme that include a multiple criteria linear programming task, at the higher level, and integer programming optimization subtasks at the lower level is applied. For solving the last ones an algorithm of the Integration of Variables methods applied. These tasks are

solved using the real data from the municipality of Ganda, Benguela, Angola, determining the basic facilities, among the available, that should be acquired and in the areas of the territory where each installation should be installed. It was demonstrated that the problem of optimal selection of energy equipment in isolated regions can be solved by the methods used.

Key words: engineering systems, energization of territories, selection of energy facilities.

Cómo citar este artículo:

Ribeiro Muhongo V, Arzola Ruiz J, Garcia Marrero LE, et al. Modelado matemático para la selección óptima de instalaciones energéticas y su esquema de solución. Ingeniería Mecánica. 2019;22(1):23-31. ISSN 1815-5944.

Introducción

En determinadas condiciones, las energías renovables se convierten en la única alternativa viable económicamente para ciertos territorios como consecuencia de la alta disponibilidad de estas fuentes y la lejanía de las redes eléctricas nacionales. En la solución de este problema resulta imprescindible tomar en consideración no solo criterios económicos sino también las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero [1]. En la bibliografía disponible, no existen trabajos que tomen en cuenta diferentes objetivos desde el punto de vista de los volúmenes de energía a ser generados por las diferentes fuentes de energía renovables (FRE), considerando las opciones disponibles de equipamiento básico en el mercado que mejor se

adecuen a las disponibilidades de energía renovable y la demanda energética del territorio y satisfagan, al mismo tiempo un conjunto de indicadores de eficiencia. Este problema se enfrenta en el presente trabajo, en el ejemplo del municipio Ganda, provincia de Benguela, Angola.

La optimización bajo criterios múltiples aporta un enfoque holístico del problema de energización de territorios aislados, para un universo de posibles opciones, mientras que los métodos de simulación aportan análisis muy detallados de soluciones independientes. Al mismo tiempo, las decisiones no son tomadas por los modelos sino por los decisores (autoridades, empresarios) auxiliados por especialistas [2]. Sin embargo, la dimensión asociada a la consideración de las ofertas disponibles en el mercado, incluso para territorios pequeños, conduce a tareas de optimización bajo criterios múltiples *Mutiple Criteria Decision Making* – MCDM [3] y múltiples niveles [4].

La utilización de técnicas heurísticas adecuadas permite no solo enfrentar tareas de optimización de gran dimensión y complejidad descriptiva, sino también aportar poblaciones de soluciones muy próximas por los criterios de optimización a la óptima y muy diversas por su naturaleza física, lo que facilita los procesos de toma de decisiones. Es precisamente este enfoque el que se utiliza en el trabajo propuesto. Se requiere, de tal forma, la utilización de métodos modernos de optimización multi-criterial, su descomposición en sub-tareas interrelacionadas de dos niveles y el uso de las técnicas heurísticas que aporten diversidad de soluciones para la ayuda de la toma de decisiones.

Los autores realizaron un análisis sistémico del problema de energización de territorios aislados de la red, en su aplicación al municipio de Ganda, Benguela, Angola [5], el que permitió deducir el modelo matemático conceptual para la solución del problema. A partir de la complejidad computacional del modelo obtenido, dada por miles de variables involucradas, se realiza su descomposición en sub-tareas interrelacionadas, según la metodología expuesta en [6].

Como resultado de la descomposición se deduce un modelo de Programación Lineal en el nivel superior, con coeficientes no conocidos, por lo que pueden ser tan solo estimados. Adquiere así una gran importancia la elaboración de procedimientos para la determinación de los parámetros de estos modelos, considerando los criterios señalados. Estos mismos criterios son asumidos por modelos formulados por otros autores [7, 8], aunque en ninguno de ellos se brinda una metodología específica para transformar la información relativa a las disponibilidades de equipamiento en el mercado y de recursos en los territorios y su integración en soluciones racionales mediante los correspondientes modelos y métodos para su solución.

La información correspondiente a las disponibilidades de recursos energéticos de los territorios se obtiene a partir de las metodologías existentes para la realización de estos cálculos, para las diferentes fuentes, considerando la parte de estos recursos que las autoridades del territorio pueden dedicar a este fin, de acuerdo a las condiciones geográficas, disponibilidades de superficie, existencia de viales, etc.

El problema se soluciona para el ejemplo del municipio de Ganda, Angola. Este municipio consta de 5 zonas, denominadas comunas. Se asumen como fuentes de energía la solar-fotovoltaica, eólica, bio-digestión y termo-gas. En los experimentos computacionales mostrados en el trabajo se utilizaron 10 opciones de equipamiento por fuente. Se empleó la metodología de descomposición propuesta en [6], el método simplex de la Programación Lineal y el algoritmo de Exploración de Códigos Variables del método de Integración de Variables [6].

Así, para el cálculo de las disponibilidades de las fuentes de energía estudiadas se utiliza: para la energía solar-fotovoltaica los trabajos [9, 10], para la energía eólica que puede ser generada en determinado territorio los trabajos [11, 12], para la energía de digestión anaerobia el trabajo [13], para la energía de gasificación termoquímica el trabajo [14]. Para el cálculo de las emisiones por diferentes fuentes de energía es es utiliza el trabajo [15].

Como resultado se generan opciones ordenadas de solución, que satisfacen los criterios utilizados para todas y cada una de las zonas entre las que se supone que los decisores seleccionen aquellas que mejor satisfacen su sistema completo de preferencias. Los experimentos computacionales muestran la viabilidad de generar estas soluciones para tareas reales de gran complejidad.

Métodos

En lo adelante, se aplican los métodos de la programación lineal y en enteros, para la toma de decisiones en dos niveles, así como un método heurístico para la solución de las tareas del nivel inferior, dada la gran dimensión que, a pesar de la descomposición realizada [5], pueden alcanzar las tareas del nivel inferior. Surge así, la necesidad de solucionar una tarea para todo el territorio y tantas tareas como zonas lo conforman en el nivel inferior:

El modelo de aproximación para todo el territorio integra toda la generación de energía por fuente para cada zona, sin considerar las opciones de fuentes que las producirá. El modelo matemático, ecuaciones 1 a 4, describe la el objetivo y las restricciones correspondientes al modelo de programación lineal para todo el territorio.

Minimizar la distancia de Tchebysheff (1) con respecto a los indicadores deseados

$$Z = \max \left[w_1 \frac{\sum_i cc_i u_i - cct^d}{cct^d}, w_2 \frac{\sum_i ce_i u_i - cet^d}{cet^d}, w_3 \frac{\sum_i Em_i u_i - Emt^d}{Emt^d} \right] \quad (1)$$

Asegurando el cumplimiento de las restricciones (2) a (4):

$$\sum_i u_i \geq P^{\text{inf}} \quad (2)$$

$$u_i \geq P_i^{\text{inf}}, \quad \forall i = 1, \dots, nz \quad (3)$$

$$u_i \geq \sum_j Disp_{ij}, \quad \forall i = 1, \dots, nz \quad (4)$$

La generación de opciones de solución por zonas se realiza por el modelo conceptual presentado en[5], considerando tan solo la zona i . Así, se requiere solucionar el modelo matemático (5) a (7).

Minimizar:

$$Z_i = \max \left[w_1 \frac{\sum_j \sum_k cc_{ijk} C_{jk} \Theta_{ijk} - cct^d}{cct^d}, w_2 \frac{\sum_j \sum_k ce_{ijk} C_{jk} \Theta_{ijk} - cet^d}{cet^d}, w_3 \frac{\sum_j \sum_k Em_{ijk} \Theta_{ijk} - Emt^d}{cct^d} \right] \quad (5)$$

Asegurando el cumplimiento de las restricciones (6) a (7):

$$\sum_j \sum_k cc_{ijk} C_{jk} \Theta_{ijk} \geq u_i \quad (6)$$

$$\sum_k C_{jk} \Theta_{ijk} \leq Disp_{ij} \quad (7)$$

En el modelo, ecuaciones 5 a 7 se toman en consideración solo aquellas opciones correspondientes a las ofertas disponibles en el mercado de las diferentes fuentes energéticas que aseguren el cumplimiento de la tarea u_i .

Algoritmos de solución empleados

Para la solución del modelo, ecuaciones 1 a 4, se utiliza el método simplex de la Programación Lineal implementado en MatLab.

El modelo, ecuaciones 5 a 7, constituye un modelo de la Programación en Enteros, para la solución del cual existen métodos eficaces. Sin embargo, a dimensión de las tareas reales puede resultar en el orden de muchos cientos de variables. Si, además, se establece el requisito de la generación de poblaciones de solución el problema se torna de muy alta complejidad. Por lo anterior, se hace necesaria la introducción de las heurísticas para tareas de la complejidad asociada a estos modelos.

En la solución de los nz modelo, ecuaciones 5 a 7. En el presenta trabajo se utiliza el algoritmo de Exploración de Códigos Variables del método de Integración de Variables [6], cuyo pseudocódigo se muestra en la figura 1.

El concepto de este método se vincula a la evolución de la cantidad requerida de códigos con ayuda de un conjunto de operadores para actualizar los miembros de una población. La aplicación de cualquier heurística derivada del método de Integración de Variables requiere de la definición de un método para la creación de la población inicial, una función de calidad (*fitness*) que permita ordenar los códigos de acuerdo con los valores de la función objetivo, operadores para alterar la composición de los códigos de las soluciones en las poblaciones sucesivas.

Un caso particuoar de este método está constituido por el algoritmo de Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de Códigos Variables, el que hace evolucionar varios códigos simultáneamente. Se hacen particiones aleatorias, por cada combinación de los puntos internos de las particiones se decodifica la solución correspondiente y se selecciona la componente por cada código variable que se corresponde con la combinación de ellos que aportan el mejor valor de la función objetivo, se elimina el subintervalo de cada código variable que no contiene la componente por ese código de la mejor solución entre las 2^n soluciones evaluadas. En cada paso se abre totalmente el intervalo de variación del código que tenga un valor del intervalo de búsqueda menor o igual a 2. Se acumula una población de soluciones, compuesta por valores concretos de n códigos y se compara el valor de la función objetivo de la peor solución de esa población con el de la función objetivo de cada solución generada en el proceso de búsqueda y se sustituye la peor en caso que la recién generada la mejor.

El procedimiento se aplica a cada una de las zonas consideradas y como resultado se tiene un número de opciones de energización para cada una de ellas. La generación de los códigos a evaluar se realiza de forma aleatoria mediante una función Rand. La decodificación de los códigos decimales seleccionados *Cod1* y *Cod2* se realiza con la función **DeCod** a partir del pseudocódigo. Cada entero consecutivo desde 0 hasta *Inter0(i)*

representa una opción de solución a evaluar, correspondiente a la fuente de energía i . La codificación numérica ordenada consecutivamente permite realizar una exploración eficiente de estos códigos.

```

01 Start
02 For i = 1 to nf
03   Inter0(i) = Cod (FuentesEnergOrd(i), nop(i))
04 Next i
05 Repeat
06   For i = 1 to nf //verificar intervalo de búsqueda
07     If (CodMax(i) - CodMin(i)) ≤ 2 Then
08       CodMin(i) = 0, CodMax(i) = Inter0(i)
09     Else // generar combinaciones de fuentes de energía
10       Cod1(i) = Rand (CodMin(i), CodMax(i))
11       SolucionOpc1(i) = DET OPCION FUENTE (DeCOD(Cod1(i)))
12       Cod2(i) = Rand (CodMin(i), CodMax(i))
13       SolucionOpc2(i) = DET OPCION FUENTE(DeCOD(Cod2(i)))
14     Next i
15     ListCombSol = Combina (SolucionOpc1, SolucionOpc2)
16     For k = 1 to Length(ListCombSol)
17       Z_Fitness = GetFunctionZ(ListCombSol(k)) //calcula función objetivo
18       If Length(Poblacion) < CInd Then //crear poblacion
19         AddPoblacion (ListCombSol(k), Z_Fitness): UpPS = True
20       Else UpPS = UpdatePoblacion(ListCombSol(k), Z_Fitness)
21       If Z_Fitness < Z_FitnessBest Then
22         Z_FitnessBest = Z_Fitness: ListBestComb = ListCombSol(k)
23     Next k
24     ListBestCod = GetCod(ListBestComb)
25     For i = 1 to nf // verificar intervalo de búsqueda
26       If ListBestCod(i) = Cod1(i) Then CodMax(i) = Cod2(i)
27       Else CodMin(i) = Cod1(i)
28     Next i
29     If UpPS = True Then NoAct = 0 Else NoAct = NoAct + 1
30     Until (NoAct > NoActMax) // evaluar criterio de parada
31 End

```

Fig. 1. Pseudocódigo del algoritmo de Exploración de Códigos Variables

Esta ventaja es aprovechada en la heurística descrita para la evolución de la población de soluciones (*Poblacion*). Inicialmente, los límites inferior y superior de los cortes son 0 e $Inter0(i)$, respectivamente. Los códigos obtenidos son decodificados $S1$ y $S2$ y, posteriormente, se evalúan a partir del cálculo de la función objetivo $Z_Fitness1$ y $Z_Fitness2$. Estos valores de la función objetivo se comparan y se elimina el subintervalo que contiene el peor valor mediante el ajuste de los límites $CodMin$ y $CodMax$, asumiendo respectivamente el valor del peor código $CodMin = Cod1$ o $CodMax = Cod2$. $Cod(i)$ es el identificador de opción, según el orden establecido para la fuente i ; la decodificación se realiza de acuerdo al algoritmo desarrollado para el método de Integración de Variables.

La población de soluciones (*Población*) se crea en la propia búsqueda, con la ayuda de la función *AddPoblación*. Si el número de individuos es menor que la cantidad máxima de individuos permitidos $CInd$, las soluciones se incluyen y ordenan por el valor de su función objetivo. Una vez alcanzado el número máximo de individuos de la población, las nuevas soluciones se comparan con la peor solución de la población en la función *Update Población*. Si la solución es mejor, es incluida en la población y el contador *NoAct* se reinicializa en 0. La función *UpdatePoblación* devuelve Verdadero (True) si se ha actualizado la población y Falso (False) si no, y se almacena en la variable *UpPS* para su posterior valoración. La regla de búsqueda termina su discriminación de intervalos cuando la diferencia entre $CodMin$ y $CodMax$ es menor o igual a 2. Para garantizar la exploración de nuevas zonas de la serie de códigos compactos, los límites $CodMin$ y $CodMax$ se restauran a sus valores iniciales (v. línea 04 del pseudocódigo) y el procedimiento de cortes aleatorios se repite hasta alcanzar el criterio de parada, que consiste en obtener un número de iteraciones seguidas $NoActMax$ sin que mejore el valor de la función objetivo de la peor entre las soluciones de la población.

A partir de estas soluciones obtenidas, se evalúan para la tarea superior de conciliación aquellas combinaciones que optimizan los criterios generales de selección de opciones de energización. Como la cantidad de combinaciones para evaluar es significativamente inferior que las opciones de energización a evaluar por fuente para cada zona, se puede aplicar la búsqueda exhaustiva o algún procedimiento de búsqueda que asegure la obtención del óptimo global de combinaciones [6].

El sistema de modelos (1) a (4) presenta la complejidad que los datos de costos y de emisiones por zona son desconocidos de antemano. Para enfrentar esta dificultad se hace una estimación inicial de los parámetros de costos y emisiones para cada una de las zonas. Las particularidades de la tarea estudiada permiten seguir el siguiente procedimiento de estimación inicial:

- El exceso de demanda para todo el territorio con respecto a la suma de la demanda de todas las zonas se reparte proporcionalmente por zona según las disponibilidades de esta.
- Se realiza la generación de soluciones por zonas y se toman los parámetros de costos y emisiones en la mejor solución obtenida por cada zona como los correspondientes datos iniciales para el modelo de programación lineal.

Con los datos iniciales se soluciona el modelo, ecuaciones (1) a (4), cuyos resultados aportan los valores de potencia a ser realmente implementados en el modelo, ecuaciones (5) a (7) para cada zona. Mientras no exista coincidencia entre los parámetros estimados y calculados para el modelo lineal el proceso se repite.

En adelante se observan los datos utilizados para una corrida experimental de los modelos, de acuerdo a la metodología y algoritmos expuestos anteriormente. Con el fin de reducir la exposición, nos limitamos tan solo a 4 fuentes de energía, 10 opciones de equipamiento por fuente y los datos de disponibilidades y demandas del territorio estudiado.

Los valores medios de disponibilidades por zonas y fuentes de energía calculados a partir de los datos calculados por las metodologías expuestas se muestran en la tabla 1, mientras que la demanda por zonas se muestra en la tabla 2.

Tabla 1. Disponibilidad de generación de potencia por zonas y fuentes energéticas

| | Fotovoltaica (KW) | Eólica (KW) | Biodigestión (KW) | Termogás (KW) | Total Zonas |
|----------------------|----------------------|----------------|----------------------|------------------|----------------|
| Zona 1 | 1 569 | 1 980 | 862 | 100 | 4 511 |
| Zona 2 | 2 853 | 3 600 | 1 000 | 0 | 7 453 |
| Zona 3 | 2 853 | 3 600 | 1 150 | 0 | 7 603 |
| Zona 4 | 1 427 | 1 800 | 725 | 19 | 3 971 |
| Zona 5 | 5 564 | 7 020 | 1 500 | 30 | 14 114 |
| Total fuentes | 14 266 | 18 000 | 5 237 | 149 | 3 7652 |

Tabla 2. Demanda por zonas, calculadas según demanda unitaria media de 0,2 KW por casa más el 20 % del total de demandas sociales en KW

| Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 | Suma + 20 % |
|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| 2 466 | 4 300 | 4 321 | 2262 | 8 632 | 2 6377 |

La información correspondiente a los costos de adquisición de equipamiento y de operación, para las diferentes opciones disponibles en el mercado, por fuentes de energía renovable, se encuentra en Internet en el sitio web: http://www.alibaba.com/product-detail/Durable-Biodigestor-Biogas-SystemProduction_60696841191.html?spm=a2700.7724838.2017.115.1.31b879efAkeTDx&s=p

En las tablas 3 a la 6, se muestran las opciones de equipamiento por fabricantes seleccionadas para el presente trabajo.

Tabla 3. Opciones de ofertas de paneles solares

| Nºde Opciones | Marca | Costos de Inversión (USD/kW) | Costos de Operación (USD/kW) | Emisiones (gr/ kWh) | Capacidad (kW) |
|------------------|-----------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------|
| 1 | Exsolar | 438 | 8,76 | 111 | 0,080 |
| 2 | Exsolar | 400 | 8,00 | 105 | 0,100 |
| 3 | Exsolar | 400 | 8,00 | 95 | 0,150 |
| 4 | Exsolar | 400 | 8,00 | 80 | 0,200 |
| 5 | Kocera | 400 | 8,00 | 90 | 0,175 |
| 6 | ERA Solar | 359 | 7,00 | 85 | 0,195 |
| 7 | ERA Solar | 333 | 6,60 | 70 | 0,300 |
| 8 | Talesun | 400 | 8,00 | 100 | 0,125 |
| 9 | Artesa | 468 | 9,00 | 75 | 0,235 |
| 10 | Jinko | 400 | 8,00 | 65 | 1,000 |

Tabla 4. Opciones de ofertas de aerogeneradores

| Nº de Opciones | Marca | Costos de Inversión (USD/kW) | Costos de Operación (USD/kW) | Emisiones (gr/ kWh) | Capacidad kW |
|----------------|---------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------|
| 1 | Rutland | 556 | 13,9 | 41,5 | 1,80 |
| 2 | TECHNOSUN | 320 | 8,0 | 28 | 100,00 |
| 3 | Breeze Marine | 288 | 7,0 | 33 | 35,00 |
| 4 | ANE | 240 | 6,0 | 35 | 25,00 |
| 5 | 30 Land | 320 | 8,0 | 39 | 6,25 |
| 6 | 40 Land | 380 | 9,5 | 40 | 5,00 |
| 7 | WES | 250 | 6,0 | 35 | 20,00 |
| 8 | PGE | 260 | 6,5 | 35 | 25,00 |
| 9 | ANE | 300 | 7,5 | 33 | 30,00 |
| 10 | WES | 350 | 8,7 | 30 | 80,00 |

Tabla 5. Opciones de ofertas de biodigestores

| Nº de Opciones | Marca | Costos de Inversión (USD/kW) | Costos de Operación (USD/kW) | Emisiones (gr/ kWh) | Capacidad (kW) |
|----------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------|
| 1 | PUXIN | 671 | 67,0 | -279 | 298,0 |
| 2 | PUXIN | 667 | 66,7 | -275 | 150,0 |
| 3 | Kingdobiogas container | 667 | 66,7 | -262 | 30,0 |
| 4 | PUXIN | 475 | 47,5 | -255 | 0,8 |
| 5 | Amoco | 578 | 57,8 | -258 | 5,0 |
| 6 | Center Enamel | 430 | 43,0 | -260 | 15,0 |
| 7 | PUXIN | 667 | 66,7 | -265 | 60,0 |
| 8 | Center Enamel | 417 | 41,7 | -260 | 12,0 |
| 9 | Sunsungs | 426 | 42,6 | -268 | 91,0 |
| 10 | Center Enamel | 420 | 42,0 | -270 | 119,0 |

Tabla 6. Opciones de ofertas de gasificadores por fabricantes

| Nº de Opciones | Marca | Costos de Inversión (USD/kW) | Costos de Operación (USD/kW) | Emisiones (gr/ kWh) | Capacidad (kW) |
|----------------|---------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------|
| 1 | ShangqiuHaiqi | 700 | 70 | 50 | 500 |
| 2 | Tmtc | 333 | 33 | 58 | 150 |
| 3 | Hongji | 514 | 51 | 68 | 14 |
| 4 | Pulita | 714 | 71 | 68 | 14 |
| 5 | Huanhai | 500 | 50 | 63 | 80 |
| 6 | Huanhai | 700 | 70 | 50 | 500 |
| 7 | Pulita | 500 | 50 | 65 | 50 |
| 8 | Haiqi | 500 | 50 | 55 | 200 |
| 9 | Huanhai | 667 | 67 | 70 | 30 |
| 10 | Haiqi | 625 | 62 | 60 | 100 |

Resultados y Discusión

Luego de 3 iteraciones el modelo de programación lineal aportó los siguientes resultados de potencia a ser generados por cada zona.

- Zona-1: 2466 kW
- Zona-2: 6953 kW
- Zona-3: 4855 kW
- Zona-4: 3471 kW
- Zona-5: 8632 kW

Con estas potencias y utilizando el algoritmo mostrado en la fig. 1, se generaron poblaciones de solución para cada una de las zonas. En la tabla 7 se muestran las diez mejores soluciones de la población generada para cada una de las zonas del territorio considerado. Por cada solución se muestran: las fuentes energéticas a ser utilizadas, las opciones de equipamiento seleccionadas por fuente y su cantidad. Entre estas opciones de decisión los decisores pueden seleccionar las definitivas tomando en consideración factores tales como: la

composición de valores de los criterios asociados a cada solución, ver tabla 8, áreas concretas en cada zona a instalar el equipamiento, posibles redes de transmisión de energía, transportación de biomasa, y otros.

Tabla 7. Diez mejores soluciones encontradas para cada una de las zonas del territorio

| | | Zona-1 | | Zona-2 | | Zona-3 | | Zona-4 | | Zona-5 | |
|----|-----|--------|------|--------|-------|--------|------|--------|-------|--------|-------|
| | | O-P | Cant | O-P | Cant | O-P | Cant | O-P | Cant | O-P | Cant |
| 1 | F-1 | 4-0,2 | 2544 | 10-1 | 2609 | 10-1 | 1300 | 10-1 | 1384 | 2-0,1 | 18856 |
| | F-2 | 4-25 | 79 | 4-25 | 142 | 4-25 | 142 | 4-25 | 72 | 4-25 | 274 |
| | F-3 | - | - | 6-15 | 53 | 4-0,8 | 86 | 4-0,8 | 360 | - | - |
| | F-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | F-1 | 4-0,2 | 2654 | 3-0,15 | 18713 | 10-1 | 1762 | 4-0,2 | 7076 | 2-0,1 | 17525 |
| | F-2 | 4-25 | 78 | 4-25 | 143 | 4-25 | 124 | 7-20 | 88 | 4-25 | 275 |
| | F-3 | - | - | 6-15 | 41 | 4-0,8 | 22 | 2-150 | 2 | 4-0,8 | 33 |
| | F-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | F-1 | 3-0,15 | 3535 | 3-0,15 | 18717 | 10-1 | 2050 | 10-1 | 1356 | 4-0,2 | 9166 |
| | F-2 | 3-35 | 56 | 4-25 | 144 | 4-25 | 114 | 3-35 | 51 | 4-25 | 266 |
| | F-3 | - | - | 4-0,8 | 682 | 4-0,8 | 6 | 4-0,8 | 415 | 2-150 | 1 |
| | F-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | F-1 | 3-0,15 | 3722 | 3-0,15 | 18710 | 10-1 | 2563 | 4-0,2 | 7094 | 3-0,15 | 12376 |
| | F-2 | 3-35 | 55 | 4-25 | 144 | 4-25 | 92 | 4-25 | 72 | 4-25 | 278 |
| | F-3 | - | - | 4-0,8 | 684 | 4-0,8 | 3 | 4-0,8 | 331 | 4-0,8 | 15 |
| | F-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 5 | F-1 | 10-1 | 755 | 3-0,15 | 18731 | 10-1 | 2584 | 3-0,15 | 9481 | 4-0,2 | 9064 |
| | F-2 | 4-25 | 78 | 4-25 | 144 | 4-25 | 93 | 3-35 | 51 | 4-25 | 274 |
| | F-3 | 4-0,8 | 13 | 4-0,8 | 682 | - | - | 4-0,8 | 330 | 4-0,8 | 15 |
| | F-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3-14 | 1 |
| 6 | F-1 | 5-0,17 | 2814 | 4-0,2 | 14042 | 10-1 | 1522 | 10-1 | 1396 | 5-0,17 | 6572 |
| | F-2 | 35 | 56 | 25 | 144 | 35 | 97 | 20 | 89 | 25 | 278 |
| | F-3 | 4-0,8 | 19 | 4-0,8 | 688 | 4-0,8 | 87 | 4-0,8 | 394 | 2-150 | 4 |
| | F-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | F-1 | 3-0,15 | 3538 | 4-0,2 | 14207 | 10-1 | 2617 | 2-0,1 | 13399 | 3-0,15 | 10862 |
| | F-2 | 3-35 | 56 | 4-25 | 143 | 4-25 | 91 | 4-25 | 67 | 4-25 | 264 |
| | F-3 | 4-0,8 | 11 | 4-0,8 | 692 | - | - | 2-150 | 3 | 2-150 | 3 |
| | F-4 | - | - | - | - | - | - | 9-3 | 4 | - | - |
| 8 | F-1 | 2-0,1 | 5704 | 4-0,2 | 14229 | 10-1 | 1639 | 10-1 | 1301 | 4-0,2 | 9256 |
| | F-2 | 4-25 | 76 | 4-25 | 144 | 4-25 | 143 | 4-25 | 72 | 4-25 | 280 |
| | F-3 | 4-0,8 | 6 | 4-0,8 | 662 | 5-5 | 11 | 4-0,8 | 491 | 4-0,8 | 27 |
| | F-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 9 | F-1 | 4-0,2 | 2912 | 4-0,2 | 14233 | 10-1 | 2562 | 4-0,2 | 6791 | 3-0,15 | 13300 |
| | F-2 | 3-35 | 55 | 4-25 | 144 | 4-25 | 100 | 7-20 | 84 | 4-25 | 276 |
| | F-3 | 4-0,8 | 1 | 4-0,8 | 663 | - | - | 2-150 | 3 | 4-0,8 | 1 |
| | F-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10 | F-1 | 10-1 | 492 | 3-0,15 | 18956 | 10-1 | 1801 | 5-0,17 | 8115 | 4-0,2 | 8497 |
| | F-2 | 4-25 | 79 | 4-25 | 143 | 3-35 | 91 | 2-100 | 18 | 4-25 | 279 |
| | F-3 | 4-0,8 | 3 | 4-0,8 | 684 | - | - | 4-0,8 | 297 | 4-0,8 | 50 |
| | F-4 | 7-50 | 1 | - | - | - | - | 3-14 | 1 | 9-3 | 3 |

Leyenda: O-P: opción de la fuente y su potencia; Cant: cantidad de instalaciones de la opción (O)

El sistema de modelos admite su perfeccionamiento tomando en consideración el carácter aleatorio del comportamiento de la velocidad de los vientos, de la radicación solar, de la llegada de la biomasa a los biodigestores y termo-generadores.

Las tareas de energización de territorios requieren de modelos que tomen en cuenta todas las fuentes de energía posibles, adicionando a las presentes en los modelos estudiados, la energía hidráulica, geotérmica y otras, incluyendo aquellas que utilizan combustibles fósiles, pues se trata de energizar territorios de la mejor manera posible. Otra posible generalización consiste en la consideración de la posible conexión a las redes nacionales con todo lo que esto implica.

Por otra parte, este sistema de modelos forma parte de otros modelos de mayor envergadura correspondientes a los territorios mayores dentro del cual se encuentra el estudiado y sistemas de menor envergadura que estudien la ubicación física del equipamiento, las distancias a recorrer para recibir biomasa, líneas de transmisión de la energía dentro del territorio y otros muchos factores. Desde el punto de vista matemático se hace necesario comparar el procedimiento de solución utilizado con otros, incluyendo las

mejores heurísticas evolutivas que aparecen en la bibliografía, entre otras posibles investigaciones relacionadas.

Tabla 8. Comportamiento de los criterios de optimización para las diez mejores soluciones encontradas

| | | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 |
|----|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | Inv(\$) | 677520 | 2237450 | 1404680 | 1122400 | 2398240 |
| | Ope(\$/año) | 5847 | 48859 | 12183 | 21389 | 21249 |
| | Emi(gr) | 57,301 | 44,660 | 18,761 | 0,189 | 552,631 |
| 2 | Inv(\$) | 680320 | 2245230 | 1457160 | 1206080 | 2363540 |
| | Ope(\$/año) | 6001 | 52118 | 11378 | 17721 | 21461 |
| | Emi(gr) | 59,736 | 492,244 | 31,461 | 157,947 | 511,482 |
| 3 | Inv(\$) | 772100 | 2246180 | 1506280 | 1210100 | 2429280 |
| | Ope(\$/año) | 6034 | 51616 | 11813 | 23368 | 21650 |
| | Emi(gr) | 93,798 | 447,012 | 37,697 | -4,445 | 206,199 |
| 4 | Inv(\$) | 773320 | 2246520 | 1578340 | 1125300 | 2416260 |
| | Ope(\$/año) | 6226 | 51684 | 13461 | 25548 | 21676 |
| | Emi(gr) | 98,724 | 446,686 | 46,958 | 134,899 | 328,229 |
| 5 | Inv(\$) | 774940 | 2247020 | 1591600 | 1204260 | 2382020 |
| | Ope(\$/año) | 5571 | 51633 | 13462 | 25549 | 21957 |
| | Emi(gr) | 13,469 | 447,382 | 47,560 | 227,286 | 203,042 |
| 6 | Inv(\$) | 764200 | 2247920 | 1611860 | 1153120 | 2528040 |
| | Ope(\$/año) | 6453 | 52198 | 13106 | 25564 | 19455 |
| | Emi(gr) | 69,517 | 443,494 | 22,207 | -1,837 | 166,697 |
| 7 | Inv(\$) | 776460 | 2257520 | 1592800 | 1245960 | 2535720 |
| | Ope(\$/año) | 6455 | 52244 | 13562 | 16026 | 21974 |
| | Emi(gr) | 93,098 | 268,08 | 48,136 | 391,304 | 288,974 |
| 8 | Inv(\$) | 686440 | 2253880 | 1545390 | 1138980 | 2430740 |
| | Ope(\$/año) | 6501 | 51162 | 13608 | 26002 | 22135 |
| | Emi(gr) | 166,681 | 270,70 | 30,195 | -10,589 | 206,499 |
| 9 | Inv(\$) | 783340 | 2254580 | 1624800 | 1263280 | 2454380 |
| | Ope(\$/año) | 6457 | 51206 | 13522 | 18065 | 22208 |
| | Emi(gr) | 65,144 | 270,72 | 47,231 | 151,499 | 353,585 |
| 10 | Inv(\$) | 783915 | 2255280 | 1630400 | 1264110 | 2378760 |
| | Ope(\$/año) | 6361 | 51956 | 10836 | 24366 | 22372 |
| | Emi(gr) | 196,555 | 453,16 | 33,352 | 181,996 | 188,051 |

Leyenda: Inv - Costo de inversión; Ope - Costo de operación; Emi - emisiones a la atmósfera

En la tabla 6 se brinda el comportamiento de los indicadores de eficiencia para las 10 primeras opciones, correspondientes a las soluciones que aparecen en la tabla 7. La validación en investigaciones de este tipo se resume en la verificación de la factibilidad de las soluciones encontradas y la validación de los métodos empleados, expresada por las publicaciones de primer nivel. La factibilidad de las soluciones encontradas se demuestra por el valor igual a cero de la función de penalización por todas y cada una de las soluciones generadas, lo que significa que se cumplen todas las restricciones del modelo. La proximidad de las soluciones encontradas al óptimo está dada por la universalidad de los métodos utilizados, especialmente la Programación Lineal. La heurística empleada se ha validado en múltiples aplicaciones, en comparación con los algoritmos genéticos elitistas, ver [16].

El trabajo realizado aporta la modelación matemática básica para la selección racional del equipamiento necesario para energizar territorios considerando las 4 fuentes de energía renovable, en las condiciones de no conexión a la red eléctrica nacional, considerando la situación de las zonas que forman parte del territorio.

El modelado se realiza para las fuentes energéticas disponibles en el territorio del municipio Ganda y las zonas en las que se particiona.

Aunque se estudia un sistema bi-nivel, resulta posible su generación para territorios que requieran su partición en tres o más niveles (por ejemplo, los municipios de una provincia y las zonas del municipio). Puede, y debe, ser generalizado para condiciones estocásticas del comportamiento de las magnitudes involucradas, con otros tipos de fuentes de energía, etc.

Conclusiones

En comparación con los trabajos previos existentes en la bibliografía se establece, por primera vez, un modelo que no solo estima los volúmenes a producir por diferentes territorios, de forma de satisfacer cierta demanda utilizando las disponibilidades de las diferentes fuentes de energía renovable, sino que se generan soluciones de equipamiento básico entre los disponibles en el mercado que satisfacen criterios de costos y de emisiones,

lo que permite no solo considerar los costos de adquisición y las emisiones con mucha mayor precisión que cualquiera de los procedimientos previos de solución. Se hace, además, posible la utilización de los métodos de simulación previamente existentes para la realización de evaluaciones complementarias.

Se establece de tal forma, por primera vez, un procedimiento que integra los métodos de optimización con los de simulación y evaluación por parte de los decisores.

Referencias

1. Vangelis M, Haris D, Panos X. Multicriteria decision support in local energy planning: An evaluation of alternatives scenarios for the Sustainable Energy Action Plan. *Omega*. 2017;69:1-16.
2. Liu Y, Yao C, Wang G, et al. An integrated sustainable development approach to modeling the eco-environmental effects from urbanization. *Ecol Indic*. 2011;11:1599-608.
3. Abhishek K, Bikash S, Arvind R. Singhc, et al. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;69:596-609.
4. Jie L, Jialin H, Yaoguang H, et al. Multilevel decision-making: A survey. *Information Sciences*. 2016;112(1):463-87.
5. Muhongo VR, Ruíz JA, Garcia LE, et al. Análisis sistémico de la selección de instalaciones de energías renovables en territorios aislados. *Ingeniería Energética*. 2018;39(3):31-8.
6. Arzola Ruiz, J. *Sistemas de ingeniería*. 2da. ed, Ed. La Habana, Cuba: Félix Varela; 2012. [Consultado el: 2 de enero de 2017] [Disponible en: http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/public/descargas/sistemas_ingenieria.pdf]
7. Sahraei Manjili Y, Rajaei A, Jamshidi, MB, et al. Intelligent Decision Making for Energy Management in Microgrids with Air Pollution Reduction Policy. In: 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE). Genova, Italy: IEEE; 2012. [Consultado el: 2 de enero de 2017] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6384132>
8. Kanase Patil AB, Saini RP, Sharma MP. Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area. *Renewable Energy*. 2010;35:1342-1349.
9. Alex Okibe E, Eloka E, Andrew C. Experimental Validation of Hottel's Transmittance Model for Estimating Beam Radiation In Makurdi Location. *American Journal of Engineering Research*. 2013;02(08):51-57.
10. Gonçalves Vasconcelos SP, Aguirre González MO. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;74:590-601.
11. Carrasco Díaz D, Orozco Contreras R, Sánchez M. An assessment of wind power potential along the coast of Tamaulipas, northeastern Mexico. *Renewable Energy*. 2015;78:295-305
12. Schnarwiler JL, Prado PO, Roberts JJ. Evaluación del Recurso Eólico Mediante Herramienta Informática Desarrollada en Matlab®. In: Proceedings of 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission. São José dos Campos, Brazil; 2015. [Consultado el 15 de septiembre de 2018] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/293945726_Evaluacion_Del_Recurso_Eolico_Mediante_Herramienta_Informatica_De_sarrollada_En_MatlabR
13. Teresa M. Manual de biogás. MINENERGIA/PNUD/FAO/GEF. Chile: Editado por Proyecto CHI/00/G32 Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables; 2010. [Consultado el: 20-07-2017] Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
14. Gabisa E, Shabbir H. Potential of bio-energy production in Ethiopia based on available biomass residues. *Biomass and Bioenergy*. 2018;111:110-19.
15. Dominguez-Defause L.C., Marcos F. Sustainable and renewable implementation multicriteria energy model (SRIME)-case study: Sri Lanka. *Int J energy Environ Eng*. 2015;6(2)165-181
16. Martínez Valdés O, Arzola Ruiz J. Operadores genéticos y de búsqueda aleatoria aplicados a tareas de selección de materiales de revestimiento para cucharas metalúrgicas. *Metalurgia*. 2017;53(3):150-9.
- 17.