



APLICACIONES INDUSTRIALES

Análisis sistémico de la selección de instalaciones de energías renovables en territorios aislados

Systemic analysis of the selection of renewable energy installations in isolated territories

Valente Ribeiro Muhongo¹
Luis Enrique García²

José Arzola Ruiz³
Deny Oliva Merencio³

¹Instituto Superior Politécnico de la Universidad KatyavalaBwila, Benguela- Angola

²Centro de Estudios CAD/CAM de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya"

³Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría"

E-mail: varmuhongo@yahoo.com.br

Recibido: enero de 2018

Aprobado: mayo de 2018

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.



RESUMEN/ABSTRACT

En el trabajo se presentan resultados investigativos obtenidos por los autores en la solución de la tarea de selección óptima del equipamiento en medios de energía renovable para satisfacer las necesidades de un territorio y de cada una de sus partes a partir de las ofertas disponibles en el mercado y de las disponibilidades de recursos energéticos en el territorio. Se realiza un estudio de los trabajos de investigación existentes, vinculados a la selección de instalaciones energéticas, a partir de los que se establecen los antecedentes, se hace un análisis sistémico de la tarea de selección de instalaciones energéticas, se determina el modelo matemático conceptual para la tarea, su complejidad y el esquema de su descomposición para las condiciones próximas a las del territorio del municipio Ganda, Benguela, Angola, tomado como caso de estudio del presente trabajo.

Palabras clave: Selección de instalaciones energéticas; energía renovable; Optimización multiobjetivo; sistemas de ingeniería

The work presents research results obtained by the authors in the solution of optimal selection of renewable energy equipment task to meet the needs of a territory and each one of its parts from the offers available in the market and of the availability of energy resources in the territory. It is carried out a study of the existent research works, linked to the selection of energy installations, starting from those the antecedents settle down. A systemic analysis of the task is made, the conceptual mathematical model for the task, its complexity and the decomposition outline were determined for conditions close to the those that are present in the municipality of Ganda, Benguela province, Angola, taken as Study Case.

Keywords: Selection of energy installations; renewable energy; multiple objective optimization; engineering systems.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de soluciones para las tareas de desarrollo energético de los territorios remotos puede incluir la solución previa de tareas de partición (clustering) de los territorios en partes de áreas relativamente independientes. En la ponencia al 12 Congreso Mundial de Energía Eólica, con el título "Rural Territories Partition and Optimal Systems Development for it Energy Assurance" [1], los autores presentaron las primeras ideas sobre la solución al problema de la selección óptima del equipamiento energético para territorios aislados.

Los sistemas energéticos descentralizados, debido a sus costos, son provechosos en lugares aislados y de baja densidad poblacional, son viables en pequeñas comunidades aisladas, con bajos coeficientes de carga [2], y permiten eliminar la correlación que existe entre el consumo de energía proveniente de fuentes convencionales y el aumento de la calidad de la vida de los consumidores aislados. El establecimiento de la generación local puede ser más barato, fácil y rápido que extender una red de una estación central hacia áreas remotas de baja carga. Ya en [3], se argumenta sobre la alta complejidad de las tareas de toma de decisiones de selección de equipamiento para zonas aisladas. Para lograr una energización que asuma el desarrollo sostenible, preservando el medioambiente, se necesita conocer la disponibilidad de recursos energéticos y la tendencia de la demanda energética de los consumidores rurales para un periodo suficientemente prolongado y, sobre esta base, realizar el suministro por medio de fuentes de energía renovables. Este problema no es solucionable fácilmente sin metodologías o herramientas que ayuden a la selección de las tecnologías de transformación, la configuración de sistemas y su aplicabilidad según sea la disponibilidad de los recursos energéticos o portadores y las características de los consumidores [4].

Los beneficios sociales asociados a las energías renovables no se reducen a la reducción de las emisiones de CO₂, sino que, en determinadas condiciones, se convierten en la única alternativa viable económicamente para ciertos territorios como consecuencia de la alta disponibilidad de estas fuentes, la lejanía de las redes eléctricas nacionales, etc. Los gobiernos han adoptado políticas de energía renovable para cumplir con ciertos objetivos, además de la reducción de las emisiones de CO₂, entre los que se encuentran la creación de beneficios locales en materia de medio ambiente y salud, avances para lograr los objetivos de seguridad energética al diversificarse la cartera de tecnologías y recursos energéticos, y un mayor desarrollo social y económico gracias a oportunidades de empleo potenciales y al crecimiento económico [5].

En el acuerdo de París, la cuestión que se plantea para las próximas décadas, tanto en los países desarrollados como en los que están en vías de serlo, es conseguir simultáneamente y de forma compatible la protección del medio ambiente, la competitividad de la economía y la seguridad del suministro energético. Es necesario poner en marcha los mecanismos tecnológicos, las iniciativas y los cauces para armonizar estas tres prioridades de nuestro planeta, de nuestra civilización y de nuestro tiempo. El doble reto de la sociedad mundial es, por un lado, asegurar el desarrollo socioeconómico de una población en aumento y que, en gran parte, carece de acceso a servicios energéticos modernos, y, por otro, preservar la naturaleza y el medio ambiente, mitigando una de sus mayores amenazas: las emisiones de gases de efecto invernadero [6]. Entre las investigaciones más modernas desarrolladas en el campo del diseño de instalaciones se encuentran Karagiannis (2013) [7], Blum (2013) [8], Suberu (2013) [9], Ghaith (2014) [10], dedicadas respectivamente al diseño de diferentes componentes de un sistema energético, de un sistema híbrido energía solar fotovoltaica – minihidroeléctricas, para el diseño de sistemas integrados de fuentes convencionales y no convencionales de energía, al desarrollo de un sistema biomasa/solar fotovoltaico para la producción de electricidad y calor.

Otros muchos trabajos se dedican a la explotación de sistemas de energía renovable entre los que se encuentran Gopi (2011), el que propone una estructura de un sistema de apoyo a la decisión que puede ser usado para el manejo energético horario de una combinación de sistemas energéticos renovables, que incluye colectores solares térmicos, fotovoltaicos, turbinas eólicas y baterías conectado a la red eléctrica [11]. Estos trabajos, no contribuyen, sin embargo, a la solución del problema de selección óptima de sistemas y equipamientos para instalaciones, ofertados en el mercado, más adecuados a las necesidades y recursos de territorios aislados, que es el tema que nos ocupa.

En la bibliografía disponible existe una gran variedad de trabajos que utilizan técnicas modernas de optimización mono y multi-criterial, y de simulación, predominando el enfoque unilateral. En muchos trabajos se considera la posibilidad de tomar decisiones de selección de tecnologías de energía renovable y no renovable. En muchos de los diferentes modelos se consideran objetivos de carácter económico y medioambiental, reflejado como la minimización de costos y de las emisiones a la atmósfera. Se consideran emisiones de CO₂, NO_x, SO_x. Perera (2013) presenta un modelo de optimización multi – objetivo para la selección de equipamiento de sistemas energéticos híbridos aislados. Para la modelación utiliza como fuente renovable la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. Propone una nueva técnica para el diseño de sistemas energéticos aislados que combinan la optimización multi – objetivo con la inclusión de la Lógica Difusa, en su solución se utilizan los Algoritmos Genéticos [12]. La no consideración de la partición del territorio seleccionado por zonas reduce la efectividad del modelo pues se requiere no solo definir cuales equipos hay que instalar, sino donde se instala cada uno de ellos, Por otra parte, la no partición del territorio puede determinar la adquisición de equipamiento sobredimensionado para poderlo instalar en alguna de las zonas.

Entre otros muchos modelos basados en Programación Lineal Multi-objetivo se encuentran los propuestos por Arnette (2012) para determinar la combinación óptima de fuentes renovables de energía y fuentes de combustibles convencionales en una región dada [13], y se dedican también a temas de simulación de funcionamiento de sistemas integrados.

Kuznia y otros (2013) desarrollaron un modelo de estocástico para determinar la configuración óptima de un sistema híbrido que consiste en una instalación de energía renovable, dispositivo de almacenamiento, líneas de transmisión de larga distancia y una instalación de energía local [14].

Rodríguez (2011) trata sobre el uso de fuentes renovables de energía en comunidades aisladas, pero se dirige a transformar toda la energía primaria en energía final en forma de electricidad. Brinda, además, un modelo para la valoración integral de distintas tecnologías de electrificación rural, basado fundamentalmente en el comportamiento de los sistemas híbridos que emplean fuentes renovables, considerando múltiples criterios, tales como el porcentaje de generación diesel requerido, el costo de la energía equivalente, el valor presente neto, los costos de operación y mantenimiento, los riesgos de la instalación y la facilidad de gestión del sistema [15]. Sen (2014) realizó un estudio para determinar la mejor combinación de tecnologías energéticas renovables, a partir de los recursos disponibles en una localidad dada, que pueda suplir una demanda determinada.

El modelo de generación eléctrica está basado en múltiples combinaciones de tecnologías energéticas renovables, aplicando el software HOMER, seleccionando la mejor opción basado en el costo de la energía producida y comparando entonces, al costo por la extensión de la red eléctrica [16]. Por su parte, utilizando también el HOMER, Tanoto (2013) estudia la configuración más apropiada de generación de energía con el más bajo costo energético, utilizando como tecnologías renovables las micro-hidroeléctricas, los paneles fotovoltaicos y las turbinas eólicas. Toda la simulación se realiza por medio del programa donde se obtiene los supuestos mejores escenarios en la comunidad aislada que se escogió para este estudio. Se utilizan cuatro parámetros económicos para la elección de los mejores escenarios: costo inicial de la inversión, costo de mantenimiento, valor actual neto (VAN) y el costo de la energía [17]. Asimismo, Benedicto - García Luís (2004) [18], construye un modelo basado en los modelos SEMA y PAMER, que tuviera la capacidad de minimizar las emisiones de contaminantes y los costos y la sustitución energética. Benitez - Leyva Lázaro V. (2015) [4], elaboró un modelo denominado Generación Energética Autóctona y Limpia (GEAYL) aplicado a una comunidad rural aislada de la provincia Granma en Cuba. Este modelo parte de otros dos modelos que preceden al PAMER y el SEMA y constituye un procedimiento de apoyo a la planificación energética utilizando 5 objetivos: minimización de costos energéticos, emisiones de CO₂, emisiones de NO_x, emisiones de SO_x y maximización de la Aceptación Social de la Energía. Este último objetivo se logra mediante la utilización de técnicas AHP (Proceso Analítico Jerárquico) con los datos de entrada derivados de encuestas.

Morales-Salas J. (2015)[19], construye un modelo mixto, con la aplicación de múltiples modelos basados en la simulación, incluyendo los anteriormente expuestos, con el cual se simulan sistemas dimensionados y, mediante un procedimiento de búsqueda original, selecciona sistemas integrados de energía renovable (SIER) para la energización de zonas rurales que se encuentran aisladas de la red eléctrica, utilizando el análisis espacio – temporal, el técnico – económico y la selección bajo diferentes criterios. Se parte de la demanda de energía eléctrica, térmica y de bombeo de agua y el procedimiento de búsqueda de soluciones, selecciona y dimensiona sistemas integrados de energía solar fotovoltaica, solar térmica, biogás, instalaciones eólicas e hidráulicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

En adelante se aplican los resultados del estudio de las investigaciones principales disponibles en la bibliografía especializada dedicada a la toma de decisiones en sistemas complejos a la selección de equipamiento energético para satisfacer las necesidades de un territorio y de cada una de sus partes a partir de las ofertas de equipamientos disponibles en el mercado y de las disponibilidades de recursos energéticos en el territorio. Se brinda un resumen del estado de arte de los métodos de toma de decisiones en sistemas de alta complejidad con la aplicación de la optimización multi-criterial, simulación de soluciones y otros esquemas de estudio del problema, en su aplicación al Caso de Estudio del territorio del municipio de Ganda, provincial de Benguela, Angola.

Los modelos y procedimientos más reconocidos hasta el momento se enfocan en la determinación de la potencia a ser generada por diferentes fuentes de energía renovable sin definir el equipamiento concreto a ser adquirido entre los ofertados en el mercado, considerando el conjunto de indicadores de carácter económico y medioambiental. La solución a este tipo de problemas requiere de la utilización de esquemas de solución a tareas de alta complejidad.

El concepto de sustentabilidad debe estar estrechamente relacionado con el de desarrollo socio-económico local. Por otra parte, la electrificación rural debe ser promotora del desarrollo social, la que no debe depender exclusivamente del mercado y sus actores, sino que debe estar inmersa en la planificación del desarrollo rural. Las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica, de la eólica, de la hidroeléctrica de pequeña escala, de la biomasa en la agricultura, en la pequeña industria rural, en servicios sociales han comenzado a tener una nueva dinámica. La experiencia sugiere que hay espacio para nuevos modelos de desarrollo, los que se deben asimilar en el marco de una transferencia tecnológica adecuada [4].

El consumo de energía en un territorio depende de un conjunto variado y complejo de determinantes, que incluye aspectos tan diversos como los precios de la energía, el clima, los hábitos del consumo, el comportamiento de los ciudadanos, el peso relativo de varios sectores de actividad y, naturalmente, el nivel global de la actividad económica, medido por la riqueza producida en el territorio. De ahí la necesidad de desarrollar y/o seleccionar los sistemas o instalaciones energéticas que puedan satisfacer las necesidades demandadas, a partir de los recursos energéticos disponibles, con inferiores costos, menor impacto medioambiental, mayor fiabilidad y satisfacción social, lo que exige el desarrollo de modelos de toma de decisiones cada vez más adecuados a esta necesidad [4]. Este problema resulta extremadamente complejo, pues se requiere conciliar las necesidades y potencialidades de las diferentes zonas de un territorio con las ofertas del mercado, definiendo el equipamiento concreto que hay que adquirir para cada zona del territorio, conciliando indicadores cuantificables y subjetivos para todo el territorio [1].

Análisis sistémico de la selección de instalaciones de energía renovable

Se aplica la metodología de Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería expuesta en [20] para realizar la formulación matemática conceptual del problema de selección de instalaciones de energía renovable para las condiciones de territorios aislados.

Análisis Externo

El sistema de mayor envergadura está constituido por el sistema de desarrollo territorial, al que se subordina toda la planeación del crecimiento industrial, agrícola y de servicios de un territorio, planeación del desarrollo de comunidades urbanas de las dimensiones requeridas, según planes de desarrollo, incluidas las redes viales, de abastecimiento de agua, comunicaciones, redes energéticas, de distribución de agua y otras para cada una de las zonas que componen un territorio y con otros territorios próximos considerando los requerimientos del territorio mayor (municipio, provincia, etc.). En la figura 1, se ilustran las tareas del desarrollo territorial:

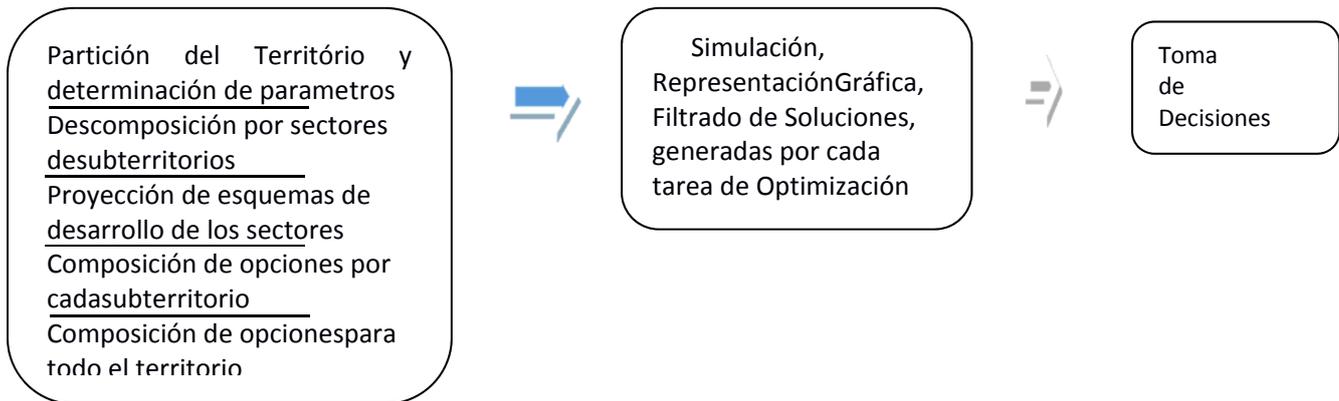


Fig. 1. Conjunto de componentes de un sistema de desarrollo territorial

El desarrollo territorial tiene que ver con todos los sectores de la economía, las construcciones asociadas, las redes de todo tipo para darle aseguramiento y debe ser rectificado en todas y cada una de las particiones de tiempo (anual, trimestral, mensual y operativamente). En la figura 2, se ilustra esta concepción. Al igual que durante la descomposición por funciones de la actividad industrial, estudiada en [20] el desarrollo territorial se descompone también por sus propias funciones [21].

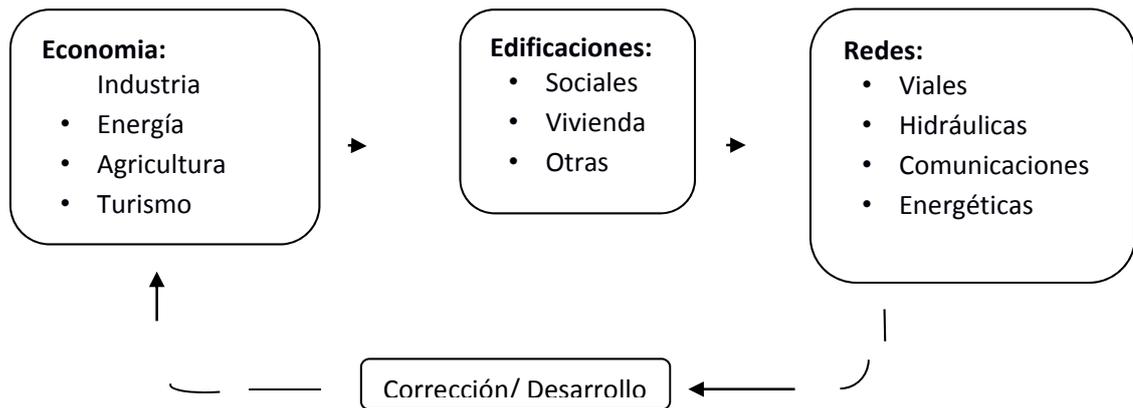


Fig. 2. Elementos de la planeación del desarrollo territorial

Entre las actividades de desarrollo que se concilian se encuentra el desarrollo de redes de energía por las zonas del territorio, como se ilustra en la figura 3. Este desarrollo tiene necesariamente que ver con las disponibilidades de recursos, las demandas de energía determinadas por los programas de desarrollo económico y social del territorio.

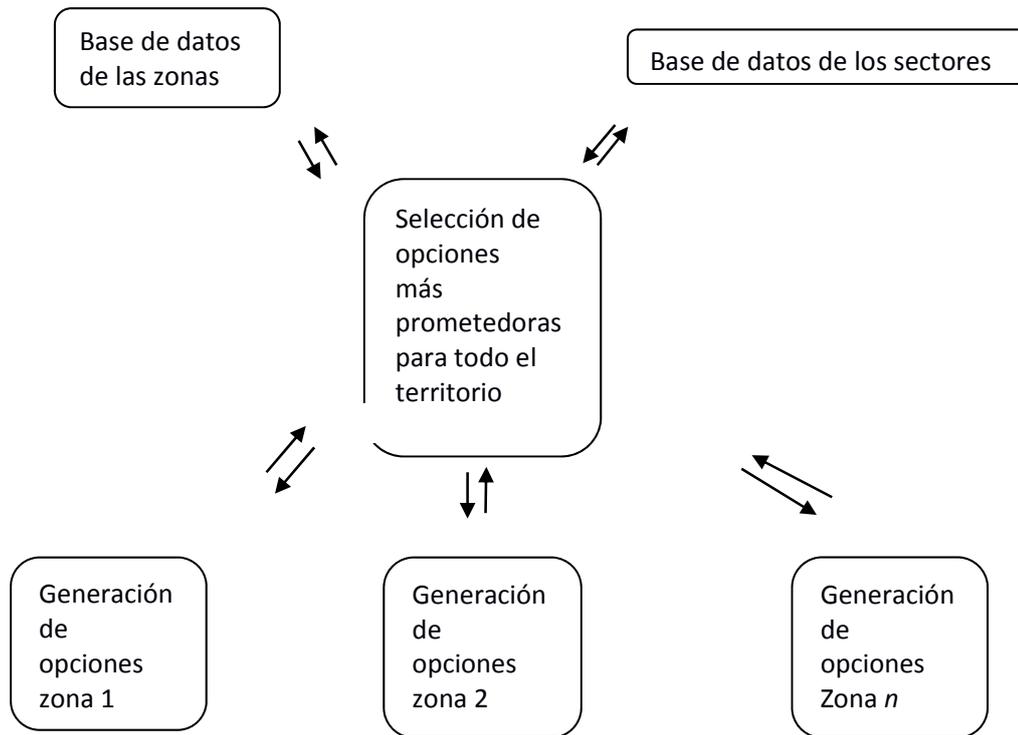


Fig. 3. Conciliación por zonas para todo el territorio, todos los sectores

El estudio del sistema mayor da lugar a la determinación de las necesidades energéticas a ser satisfechas para diferentes expectativas de tiempo, aportando las variables de decisión y sus valores para todas las zonas, durante la planeación del desarrollo de redes energéticas, al igual que se toman las decisiones en los sistemas empresariales [20]. Este análisis aporta las variables de enlace entre el sistema estudiado y el de mayor envergadura, denominadas variables de coordinación.

Variables de Coordinación - Establecen la relación del sistema estudiado con el sistema de mayor envergadura [20].

- Máxima potencia demandada para todo el territorio y para cada una de sus zonas
- Disponibilidad de potencia a partir de las fuentes naturales
-

Indicadores de eficiencia - Caracterizan el desempeño del proceso [20].

- Costos totales de instalación del sistema energético seleccionado para todo el territorio.
- Costos totales de operación del sistema energético seleccionado para todo el territorio.
- Cantidad total de instalaciones de fuentes energéticas adoptadas.

Variables de decisión-Son aquellas que pueden ser manipuladas por el decisor, para mejorar los valores de los indicadores de eficiencia del sistema estudiado [20].

Cantidad de instalaciones a ser instalada de la opción tecnológica k , variante disponible j en la zona i del territorio: $\theta_{ijk}; i = 1, \dots, cz, j = 1, 2, \dots, cv, k = 1, \dots, kt$

donde:

cz cantidad total de fuentes consideradas; cv cantidad de variantes disponibles en el mercado del tipo de fuente j

θ_{ijk} es la cantidad de instalaciones asociadas a la opción de equipamiento k de la fuente tipo j en la zona i del territorio

Modelo matemático conceptual

Del análisis externo del sistema, considerando que la opción elegida se puede representar como θ_{ijk} Cantidad de la opción de equipamiento k de la fuente tipo j en la zona i del territorio a ser seleccionada con el fin de satisfacer la demanda de la zona y/o del territorio.

La función de utilidad (1), dada por la distancia de Tchebycheff, desde la diferencia de los valores de los indicadores de eficiencia calculados menos los valores ideales totales, normalizados y ponderados. Es decir, minimizar:

$$Z = \max \left[w_1 \frac{\sum_i \sum_j \sum_k cc_{ijk} C_{jk} \Theta_{ijk} - cct^d}{cct^d}, w_2 \frac{\sum_i \sum_j \sum_k ce_{ijk} C_{jk} \Theta_{ijk} - cet^d}{cet^d}, w_3 \frac{\sum_i \sum_j \sum_k Em_{ijk} \Theta_{ijk} - Emt^d}{cct^d} \right] \quad (1)$$

El aseguramiento de los valores establecidos por el nivel superior (territorial) a las variables de coordinación se establece mediante las restricciones (2) – (4); Las restricciones a las que están sometidas las tres funciones objetivo son de balance de energía y de disponibilidad de recursos y se restringen a cubrir la demanda de cada uso final:

$$\sum_i \sum_j \sum_k C_{jk} \Theta_{ijk} \geq P^{inf} \quad (2)$$

$$\sum_j \sum_k C_{jk} \Theta_{ijk} \geq P_i^{inf}, \quad \forall i = 1, \dots, nz \quad (3)$$

$$\sum_k C_{jk} \Theta_{ijk} \leq Disp_{ij}, \quad \forall j = 1, \dots, cf; \quad i = 1, \dots, nz \quad (4)$$

Donde:

C_{ik} – Capacidad de producción de la opción k del recurso j ;

cc_{ijk} , ce_{ijk} – Respectivamente, costo de inversión y de operación de la opción k de utilización del recurso j en la zona i por unidad de potencia generada;

cct^d , cet^d – Respectivamente, costo total de Inversión y de Operación deseables para todo el territorio;

P^{inf} – Valor inferior de la potencia a generar en todo el territorio;

P_i^{inf} – Valor inferior de la potencia a generar en cada zona i ;

$Disp_{ij}$ – Disponibilidad existente de recurso j en la zona i ;

i – Contador de zonas;

j – contador de tipos de fuentes energéticas;

k – Contador de posibles opciones disponibles en el mercado de cada fuente energética;

Em_{jk} – Emisiones contaminantes generadas por la unidad de producción de energía del tipo j , opción k ;

Emt^d – Valor deseable total de emisiones para satisfacer las necesidades del territorio.

Las restricciones de balance de energía están relacionadas con el suministro de electricidad para asegurar una potencia instalada no inferior a la demandada para todo el territorio y para cada una de sus áreas, donde se toma en cuenta la generación de energía eléctrica, están expresadas en (2) y (3), donde C_{jk} es la capacidad de generación, P^{inf} es la potencia mínima para todo el territorio, P_i^{inf} es la potencia mínima para cada zona i .

La disponibilidad de fuentes de energía está supeditada al territorio de aplicación del proyecto y de sus zonas. No se puede instalar en ninguna zona ningún equipamiento que supere la disponibilidad de materia prima en la zona. La restricción relacionada con la disponibilidad de fuentes está expresada en (4).

RESULTADOS

La complejidad del modelo matemático conceptual obtenido, suponiendo las 5 zonas del municipio de Ganda, Angola, con las 5 fuentes de energía renovable predominantes (digestión anaerobia, eólica, radiación solar, hidráulica y gasificación de la biomasa), 300 ofertas de instalaciones por cada fuente, se tiene un total de $5 \times 5 \times 300 = 7500$ variables enteras con 3 criterios de optimización lo que implica un modelo de muy alta complejidad, por lo que se requiere descomponerlo en elementos de menor complejidad. De acuerdo a la metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería esto se realiza de acuerdo a la estructura misma del modelo matemático. Se requiere conciliar las necesidades y potencialidades de las diferentes zonas de un territorio con las ofertas del mercado, definiendo el equipamiento concreto que hay que adquirir para cada zona del territorio, conciliando indicadores cuantificables y subjetivos.

Entre los factores de carácter subjetivo a ser tomados en consideración, debe necesariamente estar incluida la aceptación social de las soluciones energéticas, dada la repercusión social del recurso energético [4]. Esta aceptación se refleja de muchas maneras: la aceptación por la comunidad que se construya una pequeña hidroeléctrica en su territorio, la que puede tener pequeñas consecuencias positivas o negativas en su vida diaria, las emisiones de un gasificador puede tal vez molestar a cierta comunidad, determinadas instalaciones eólicas o fotovoltaicas pueden reducir algún territorio ocupado por la agricultura o ganadería, etc. En todos los casos la comunidad tiene que dar su conformidad con las soluciones adoptadas. Ellos deben percatarse que las ventajas sobrepasan con creces las posibles desventajas. Una forma de reducir la complejidad consiste en su descomposición en subtareas más simples a partir de la aplicación de la metodología de análisis sistémico propuesta en [20] para el tratamiento de tareas complejas de toma de decisiones bajo estructuras de toma de decisiones de diferentes tipos.

Al considerar lo descrito en [22] y la aplicación de los principios de descomposición mencionados anteriormente, y dada la estructura del modelo matemático de la tarea estudiada, se realiza su descomposición mediante una estructura jerárquica participativa.

La descomposición desarrollada se muestra en el diagrama de la figura 4, en la que el sistema consiste de una tarea de optimización de mayor nivel, la cual establece tareas de aproximación (u_1, u_2, \dots, u_{nz}) a los nz niveles inferiores, encargados de solucionar una tarea de optimización de menor complejidad, propia de cada zona, que asegure un conjunto de opciones de energización (Or_1, Or_2, \dots, Or_n) próximas al mejor compromiso entre los indicadores de eficiencia de las tareas por zona. A partir de las opciones generadas, el sistema selecciona aquellas combinaciones (Or) que minimizan el criterio (1) y aseguran las restricciones (2), (3) y (4) establecidas por el sistema de mayor nivel. La descomposición de (1) – (4) se realiza por objetivos, variables y restricciones, según una estructura jerárquico – participativa. El nivel central soluciona, en una primera etapa, un modelo en “variables agregadas” u_i , mediante un modelo de aproximación por programación lineal (5)-(8), la que determina la potencia total a generar por cada una de las zonas independientemente de las variantes de que se seleccionen por cada tipo de fuente de energía renovable. En la segunda etapa, por cada zona i , se hallan las soluciones detalladas (correspondientes a las opciones de solución Or_i de esa zona por el modelo (9) – (11)). En la tercera etapa se busca, por el nivel central, la composición óptima de opciones generadas por todas las zonas. En la figura 4, se ilustra la descomposición de la tarea de selección de opciones de generación de fuentes energéticas.

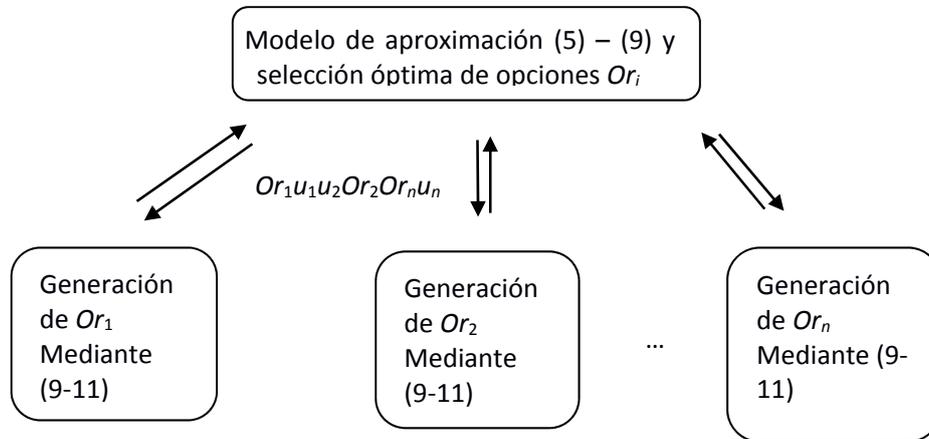


Fig. 4. Representación general de la descomposición de la tarea de selección de opciones de generación de fuentes energéticas

El modelo de aproximación para todo el territorio integra toda la generación de energía por fuente para cada zona sin considerar las opciones de esa fuente que las producirá. El siguiente modelo matemático (5) – (8) describe la acción correspondiente. Minimizar la distancia de Tchebysheff con respecto a los indicadores deseados:

$$z = \max \left[w_1 \frac{\sum_i cc_i u_i - cct^d}{cct^d}, w_2 \frac{\sum_i ce_i u_i - cet^d}{cet^d}, w_3 \frac{\sum_i Em_i u_i - Emt^d}{Emt^d} \right] \quad (5)$$

Asegurando el cumplimiento de las restricciones:

$$\sum_i u_i \geq P^{inf} ; \quad (6)$$

$$u_i \geq P_i^{inf}, \quad \forall i = 1, \dots, nz \quad (7)$$

$$u_i \leq \sum_j Disp_{ij}, \quad \forall i = 1, \dots, nz \quad (8)$$

Generación de opciones de solución por zonas. Se realiza por el modelo conceptual original, considerando tan solo la zona i . Así, se requiere minimizar la función objetivo (9) con las restricciones (10)-(11). Se toman en consideración solo aquellas opciones correspondientes a las producciones de las diferentes fuentes energéticas que aseguran el cumplimiento de la tarea u_i . La implementación del sistema de modelos (5) – (8) y (9) – (11) requiere de la determinación de una metodología que permita hallar los parámetros contenidos en ellos, a partir de las características de cada territorio concreto y de los algoritmos de solución a ambos modelos y de la corrección de los parámetros del modelo (5) – (8) a partir de las soluciones generadas por el modelo (9) – (11), para cada $i=1, \dots, cz$, lo que será estudiado en próximos artículos.

$$Z_i = \max \left[w_1 \frac{\sum_j \sum_k cc_{ijk} C_{jk} \Theta_{ijk} - cct^d}{cct^d}, w_2 \frac{\sum_j \sum_k ce_{ijk} C_{jk} \Theta_{ijk} - cet^d}{cet^d}, w_3 \frac{\sum_j \sum_k Em_{ijk} \Theta_{ijk} - Emt^d}{cct^d} \right] \quad (9)$$

Asegurando el cumplimiento de las restricciones:

$$\sum_j \sum_k C_{jk} \Theta_{ijk} \geq u_i \quad (10)$$

$$\sum_k C_{jk} \Theta_{ijk} \leq Disp_{ij}, \quad j = 1, \dots, cf \quad (11)$$

Así, en lugar de la tarea de gran complejidad original, correspondiente a la selección óptima del equipamiento correspondiente a todas y cada una de las zonas, se solucionan una tarea coordinadora en el nivel superior, de todo el territorio, y n sub-tareas correspondientes a todas y cada una de las n zonas del territorios.

CONCLUSIONES

El trabajo realizado permite extraer las siguientes conclusiones principales:

La solución al problema de la selección óptima del equipamiento, en toda su complejidad, resulta vital para la enfrentar racionalmente los problemas de energización de los territorios aislados de la red eléctrica nacional, como lo es el territorio de Ganda, provincia de Benguela, Angola, el que es utilizado como caso de estudio de la presente investigación.

La diversidad de modelos de optimización y simulación disponibles en la bibliografía, sin considerar aún el equipamiento concreto a ser adquirido entre los ofertados en el mercado, refleja la alta complejidad del problema de selección del equipamiento energético para territorios aislados de la red.

La aplicación del análisis de sistemas a la tarea de selección del equipamiento energético óptimo, incluyendo su adecuación a las condiciones de cada territorio concreto y cada una de sus zonas permitió elaborar el modelo matemático conceptual que la describe.

Dada la complejidad propia del modelo matemático elaborado, para condiciones próximas a las del Caso de Estudio adoptado, se requirió su descomposición en elementos componentes, para lo que se hizo necesario tomar en consideración los resultados obtenidos en el campo de los sistemas complejos, siendo desarrollado el sistema de modelos inter-vinculados necesario.

REFERENCIAS

- [1] Arzola- Ruiz J, Muhongo V, and Lorca-Toranzo G. “Rural Territories Partition and Optimal Systems Development for it Energy Assurance”; En: World Wind Energy Conference. La Habana, Cuba, 10, 2013. ISBN:978-3-940683-07-6. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/275211115_Rural_Territories_Partition_and_Optimal_Systems_Development_for_it_Energy_Assurance
- [2] Bahttacharyya S. “Review of alternative methodologies for analyzing off-grid electricity supply”. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2012, vol. 16, n. 1, p. 677-694. ISSN: 1364-0321. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004436>
- [3] Bazmi A, Zahedi G. “Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply- A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011; vol.15, n. 1, p. 3480-3500, ISSN: 1364-0321. Disponible en : <https://www.journals.elsevier.com/renewable-and-sustainable-energy-reviews>
- [4] Benítez- Leyva L.V. “Procedimiento multicriterio- multiobjetivo de planificación energética a comunidades rurales aisladas”. Tutor: Marcos Martín, F. Tesis Doctor. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2015. Disponible en: <http://oa.upm.es/38624/>
- [5] Pendón M, Williams E, Cibeira N, Couselo R, Crespi G, Tittonel M. “Energía renovable en Argentina: cambio de paradigma y oportunidades para su desarrollo”. En: *IV jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería*, La Plata, 2017, p. 573-580; ISBN: 978-950-34-1453-8. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/60384>

- [6] Quibus, A.C. “El papel de la energía nuclear. Cuadernos de Energía” En: El acuerdo de París sobre cambio climático (COP21). Enero 2016; n. 47, p. 35-42. ISSN: 1698-3009. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=21436>
- [7] I.E. Karagiannis, P.P. Groumpos. “Modeling and analysis of a hybrid-energy system using fuzzy cognitive maps”. En: Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). 2013. p. 257-264. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6608731/>
- [8] N.U. Blum, R. Sryantoro Wakeling, T.S. Schmidt. “Rural electrification through village grids - Assessing the cost competitiveness of isolated renewable energy technologies in Indonesia”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 22, p. 482-496. ISSN 1364-0321. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211300097X>
- [9] M.Y. Suberu, M.W. Mustafa, N. Bashir, N.A. Muhamad, A.S. Mokhtar. “Power sector renewable energy integration for expanding access to electricity in sub-Saharan Africa”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 25, n.3. p. 630-642. ISSN 1364-0321. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002852>
- [10] F.A. Ghaith, R. Abusitta. “Energy analyses of an integrated solar powered heating and cooling systems in UAE”. *Energy and Buildings*, 2014, vol. 70, n.3, p. 117-126. ISSN 0378-7788. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813007214>
- [11] P. Gopi, I.P. Reddy. “Modeling and optimization of renewable energy integration in buildings”. En: Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011), International Conference. 20-22 July 2011, 2011. p. 116-120. Disponible en: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2011.0345>
- [12] A.T.D. Perera, R.A. Attalage, K.K.C.K. Perera, V.P.C. Dassanayake. “A hybrid tool to combine multi-objective optimization and multi-criterion decision making in designing standalone hybrid energy systems”. *Applied Energy*, 2013, vol. 107, n. 2. p. 412-425. ISSN 03062619. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913001578>
- [13] A. Arnette, C.W. Zobel. “An optimization model for regional renewable energy development”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, n.7, p. 4606-4615. ISSN 1364-0321. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112002729>
- [14] L. Kuznia, B. Zeng, G. Centeno, Z. Miao. “Stochastic optimization for power system configuration with renewable energy in remote areas”. *Annals of Operational Research*, 2013, vol. 210, n.1, p. 411-432. ISSN 0254-5330. Disponible en: <https://rd.springer.com/article/10.1007/s10479-012-1110-9>
- [15] C. Rodríguez Borges. “Valoración integral de sistemas híbridos para la electrificación rural”. Tutor: Antonio Sarmiento Sera. Tesis Doctoral. Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2011. La Habana. Disponible en: <https://www.amazon.com/Valoraci%C3%B3n-integral-sistemas-h%C3%ADbridos-electrificaci%C3%B3n/dp/3656915202>
- [16] R. Sen, S.C. Bhattacharyya. “Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER”. *Renewable Energy*. 2014, vol. 62, n.º. 4, p. 388-398. ISSN 0960-1481. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113003832>
- [17] Y. Tanoto, M. Santoso, C. Massay. “Off-grid fully renewable energy with free capacity shortage for remote electrification”. En: Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO. Langkawi. 2013. p. 464-468. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6564593/>
- [18] García B.L. “Desarrollo de un modelo multicriterio-multiobjetivo de oferta de energías renovables: Aplicación a la comunidad de Madrid”. Tutor: Marcos Martín, F. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid; Madrid, 2004. Disponible en: <http://oa.upm.es/259/>
- [19] Salas J.M. “Modelo para el dimensionado, simulación y selección de sistemas integrados de energía renovable en zonas aisladas”. Tutor: Moreno Figueredo C., Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de la Habana; La Habana, 2015. Disponible en: <http://tesis.cujae.edu.cu/handle/123456789/5348>
- [20] ARZOLA-RUIZ, J. *Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería*. Monografía editada en la CUJAE, 104 pp, 2009, Consultado 09/2017, Disponible en <http://www.bibliomaster.com/>. ISBN 978-959-261-299-0.
- [21] Arzola-Ruiz, J. (1989): *Selección de Propuestas*. Editorial Científico-Técnica, La Habana, 136pp., 1989. ISBN 978-959-261-281-5. Consultado 05/2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/271505670_Arzola_J_Seleccion_de_Propuestas
- [22] Arzola-Ruiz, J. *Sistemas de Ingeniería*. 2da. Edición, Ed. Félix Varela; La Habana, 482 pp., 2012, Consultado el: 2 de enero de 2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/271505692_Arzola_J_Sistemas_de_Ingenieria. ISBN 978-959-07-1762