

COMPARACIÓN DE HEURÍSTICAS PARA OPTIMIZAR EL DESPACHO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, PARA LA CIUDAD DE SALTA

Franco Zaneke

Departamento de Informática, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta
Instituto de Energías No Convencionales (INENCO), Universidad Nacional de Salta, Consejo de
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Email: zanekefranco@gmail.com

RESUMEN: Hoy en día los recursos no renovables, son los que se encuentran a la vanguardia para la generación de la energía eléctrica, mientras que se comienzan a desarrollar proyectos renovables con el fin de poder alguna manera atenuar el impacto en el ambiente que trae aparejado el uso de las fuentes convencionales. Sin embargo, cuando consideramos las fuentes renovables, existen diversas variables que debemos considerar, siendo la primordial el costo de generación y traslado. Por lo que, es necesario contar con un modelo de optimización combinatoria, con el fin de poder determinar la solución óptima que permita utilizar los recursos no renovables como los renovables, logrando reducir el impacto ambiental al menor costo posible. Para brindar una solución a este modelo, se proponen y comparan dos heurísticas una basada en enjambre de abejas y la otra basada en algoritmo genético de selección natural para el crecimiento de una población. A partir de la comparación de los datos otros de la literatura, se puede concluir que ambos modelos planteados proporcionan soluciones factibles para el problema abordado.

Palabras clave: Energías Renovables, Optimización Combinatoria, Algoritmo Genético, Enjambre de Abejas.

INTRODUCCIÓN

Un problema importante asociado con el desafío de la creciente demanda mundial de energía es la electrificación de aproximadamente dos mil millones de personas en los países en desarrollo que actualmente no tienen acceso a la electricidad. Se espera que la población mundial alcance los nueve mil millones de personas en 2050. La mayor parte de este crecimiento demográfico esperado tendrá lugar en países en desarrollo y naciones emergentes. Además, las políticas en los países emergentes se preocupan por aumentar el suministro de energía, ya que el consumo de energía per cápita se ha convertido en uno de los principales indicadores del progreso del desarrollo de un país. Estos dos factores determinan principalmente el crecimiento de la demanda energética. Con este aumento de la demanda, la pregunta gira en como poder suministrar la energía suficiente para suplirla, considerando las fuentes de generaciones actuales y considerando que las mismas son limitadas.

Sin embargo, las energías renovables son un tópico de estudio reciente, por lo que, en países poco desarrollados, como lo es Argentina, se encuentran en fases tempranas de explotación de estas. No obstante, en el resto del mundo su estudio y como potenciar y optimizar los recursos y la energía generada y su distribución, son tópicos que se encuentran estudiando desde hace unos años, esto se evidencia en los siguientes trabajos.

Los programas de simulación son las herramientas más comunes para evaluar el desempeño de los sistemas híbridos de energía renovable. Actualmente, hay muchos programas de software disponibles que se pueden descargar de los sitios web de varios laboratorios de investigación y universidades. Al utilizar los programas de simulación mencionados, se puede encontrar la configuración óptima comparando el rendimiento y el costo de producción de energía de diferentes configuraciones de sistemas. Entre ellos, uno de los programas de dimensionamiento más famosos para sistemas híbridos es HOMER, desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), Estados Unidos (Muhamad Razali y Hashim, 2010). HOMER incluye varios modelos de componentes energéticos, como fotovoltaica (PV), turbinas eólicas, hidroeléctricas, baterías, diesel y otros generadores de combustible, unidades de electrólisis y pilas de combustible, y evalúa opciones adecuadas teniendo en cuenta el costo y la disponibilidad de recursos energéticos (Zoulias y Lymberopoulos, 2007). La conexión a la red también se considera en el procedimiento de diseño de HOMER. El software requiere información inicial que incluye recursos energéticos, limitaciones económicas y técnicas, requisitos de almacenamiento de energía y estrategias de control del sistema. También se requieren insumos como el tipo de componente, capital, reemplazo, costos de operación y mantenimiento, eficiencia, vida útil, entre otros aspectos (Rehman, El-Amin, Ahmad, Shaahid, Al-Shehri, Bakhshwain y Shash, 2007).

HOMER ha sido ampliamente utilizado en estudios de casos previos de sistemas de energía renovable que tienen lugar en la literatura. Se han investigado tanto los sistemas autónomos como los de red en paralelo. Además, la combinación en paralelo de fuentes de energía renovable y sistemas convencionales como generadores diesel también ha sido considerada en muchos estudios. Los artículos en la literatura que tratan sobre el dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos usando HOMER se refieren en (Shaahid y Elhadidy, 2007; Mizani y Yazdani, 2009; Türkay y Telli, 2011; Silva, de Oliveira Marco y Severino, 2010; Bekele y Palm, 2010; Prodromidis y Coutelieris, 2010; Rehman y Al-Hadhrani, 2010). También se encuentran disponibles varias herramientas de software más para el diseño de sistemas híbridos, como "El modelo de simulación del sistema de energía híbrida (HYBRID2)" (Isherwood, Smith, Aceves, Berry, Clark, Johnson, y Seifert, 2000).

En este trabajo se plantean y comparan dos heurísticas que ayudan a resolver el problema en cuestión. El objetivo del trabajo no es solo encontrar el modelo óptimo, sino también el modelo más eficiente desde el punto de vista computacional y por lo que se plantea la comparación de las dos heurísticas. Por ello, este artículo consta en la sección METODOLOGÍA, se describe el modelo desarrollado como así también las heurísticas planteadas que ayudan a solucionar el problema. Por último, en las secciones DATOS UTILIZADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS y CONCLUSIONES, se presentan los datos y resultados obtenidos y las conclusiones a las que se llegaron con este trabajo.

METODOLOGÍA

En base a la revisión de la literatura y de los modelos propuestos por diversos autores, es que en para este trabajo se propone un enfoque para el diseño óptimo de un modelo de abastecimiento eficiente, que incluye varios generadores. Las restricciones impuestas al modelo se han aplicado para minimizar simultáneamente el costo total del sistema, la carga no satisfecha y la emisión de contaminantes. La idea de este enfoque es minimizar el costo total mientras que las emisiones de CO₂ y la carga no satisfecha se consideran restricciones limitadas por los niveles permisibles.

Descripción del problema: El sistema híbrido de energía renovable incluye paneles fotovoltaicos, turbina eólica y biomasa. Este trabajo intenta enfatizar la optimización de un diseño de un sistema híbrido de energía renovable (HRES, por sus siglas en inglés), utilizando un enfoque basado en la utilización de metaheurísticas en combinación con la simulación de los valores iniciales para las distintas fuentes. Esta, se puede utilizar como una herramienta de evaluación eficaz siempre que los modelos matemáticos no sean aplicables debido a la complejidad del sistema o las incertidumbres existentes.

La principal ventaja de utilizar el modelado de simulación es el hecho de que todos los detalles e incertidumbres del sistema pueden adaptarse con precisión en comparación con otras metodologías de modelado. Por otro lado, las técnicas de optimización necesitan una representación matemática explícita del sistema. En sistemas complejos, es difícil desarrollar el modelo matemático ya que el sistema tiene un espacio de alta dimensión o naturaleza no lineal. Por tanto, combinar el modelo de simulación con un método de optimización permite superar sus deficiencias.

Como primer paso, se define la función de optimización, que para este caso consiste en reducir los costos de generación y traslado de las energías renovables sumado al costo de generación utilizando fuentes renovables. Esto se resume en la siguiente ecuación.

$$\min \left(\sum C_i R_i + C_{\text{comb}} \left(X - \sum R_i \right) \right) \quad (1)$$

De donde:

C_i : Representa los costos (generación y traslado) de la energía renovable i .

R_i : Representa la cantidad de eléctrica que se puede generar con la energía renovable i .

X : Demanda Eléctrica a ser suplida.

$X - \sum R_i$: Dado que es bastante probable que toda la demanda eléctrica no sea suplida con energías renovables, por lo que el remanente se genera con fuentes convencionales, por lo que el costo de esa energía generada también debe ser considerada.

Para completar el modelo, es necesario definir las restricciones a las que está sujeto el modelo. Las mismas se describen a continuación:

Restricción 1: Es necesario definir y asegurar que la cantidad de energía generada no supere la demanda en un punto determinado del tiempo. Por eso se define la siguiente restricción.

$$\sum R_i \leq x \quad (2)$$

Restricción 2: Como lo que queremos es reducir la emisión de CO₂ al ambiente es necesario reducir dicha emisión para asegurar que el impacto al ambiente sea el mínimo posible. Por ello, se define la siguiente ecuación matemática.

$$\left(X - \sum R_i \right) * FE \leq \epsilon_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

Donde

FE : Corresponde al factor de emisión de dióxido de carbono.

ϵ_{CO_2} : Corresponde al delta tolerable de emisión.

Restricción 3: No negatividad de los valores generados para las energías renovables, como así también asegurar que no se superen la capacidad máxima de generación de cada fuente. Esto se resume de la siguiente manera.

$$0 \leq R_i \leq R_{\text{máx}} \quad (4)$$

Simulación de valores iniciales: Como primer paso, es necesario determinar la forma en que se van a simular cada uno de los valores de las energías renovables; ya que, para la primera iteración del modelo, dichos valores deben ser simulados de alguna manera, por lo que en el siguiente apartado se describen los mecanismos matemáticos que permiten esto. Para este caso se tienen en cuentas solo aquellas fuentes de fácil acceso y cuya explotación es factible dentro del territorio de interés.

Turbinas de Viento: la generación de energía eólica se produce a partir de la conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica. La energía resultante de una turbina eólica se calcula mediante la siguiente fórmula matemática.

$$E_{WG}(t) = \begin{cases} 0 & v < V_c \\ \frac{1}{2} C_p \rho A_{WG} v^3 \Delta t & V_c < v < V_r \\ P_{WG,r} & V_r < v < V_f \\ 0 & v > V_f \end{cases} \quad (5)$$

La velocidad del viento para cada período de tiempo $V(t)$ es una entrada del modelo. Luego, C_p es el coeficiente de rendimiento y se define como la relación entre la potencia de salida del generador de viento dividida por la potencia máxima. Por otro lado, el área de barrido del rotor se denomina A_{WG} y la densidad del aire es igual a ρ . V_c es la velocidad del viento de corte que se considera 4(m/s). V_r es la velocidad del viento nominal se establece en 14(m/s) y V_f es la velocidad del viento de corte considerada 20(m/s). $P_{WG,r}$ es la potencia nominal de la turbina eólica.

Paneles Fotovoltaicos: Las células solares o fotovoltaicas son dispositivos electrónicos que convierten la energía solar en electricidad. La energía producida por los paneles fotovoltaicos se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$E_{PV}(t) = (\eta_{PV} * A_{PV}) I_T(t) \quad (6)$$

De donde,

$I_T(t)$ es la radiación solar total por hora sobre una superficie inclinada,

η_{PV} es la eficiencia de los módulos fotovoltaicos

A_{PV} representa el área del panel fotovoltaico (m^2).

En este trabajo, se supone que el η_{pv} es constante y es igual al 7%. Este valor cubre las pérdidas de potencia en el panel fotovoltaico debido a cambios de temperatura, sombras, suciedad, pérdidas en el inversor, entre otros factores. La radiación solar en una superficie inclinada que tiene un ángulo de inclinación Φ desde la superficie horizontal y un ángulo acimutal de ξ es la suma de los componentes que consta de $I_{b,tilt}$, cielo difuso ($I_{d,tilt}$) y radiación solar reflejada en el suelo ($I_{r,tilt}$).

Biomasa: Los modelos matemáticos que permiten evaluar el potencial energético de biomasa se fundamentan en la siguiente ecuación. Los valores a introducir en cada variable dependen del material de biomasa que se esté utilizando.

$$PE = M_{b,s} * E \quad (7)$$

De donde,

PE representa el potencial energético de la biomasa considera medida en TJ/año.

$M_{b,s}$ representa masa de residuo seco medida t/año.

E representa la energía de residuo seco, que es equivalente al llamado Poder Calorífico Inferior (PCI) medida en TJ/año.

Heurísticas planteadas: El problema planteado se caracteriza por no tener una única solución y para ello deben explorarse diversas para obtener la más eficiente. Para poder hallar estas, existen diversas técnicas o algoritmos que ayudan a encontrar estas soluciones eficientes, en este trabajo se plantean dos heurísticas (Algoritmo Genético y Optimización por enjambre de abeja).

Algoritmo Genético: Los algoritmos genéticos son utilizados para la optimización y aprendizaje basado en la evolución biológica. El campo de algoritmos genéticos fue desarrollado por John Holland (Holland, 1975). Al momento de trabajar con estos algoritmos, se requieren la forma de codificar los cromosomas, que representan las soluciones al problema; una función de evaluación que determina la calificación para cada cromosoma; una forma de inicializar la población de cromosomas; operadores relacionados con los procesos biológicos asociados al cruzamiento y la mutación de individuos y los criterios de parada del algoritmo.

El método comienza con la creación de la población inicial que contendrá m individuos, donde cada individuo tendrá n genes. Cada uno de los genes representa el potencial de energía que se puede obtener con cada una de las fuentes descriptas anteriormente. De esta manera un individuo contará con 18 genes, donde cada uno de los genes corresponde a cada una de las fuentes de energías descriptas en la sección *Datos Utilizados*, estos valores fueron generados teniendo en cuenta las fórmulas descriptas en la sección de Simulación de valores iniciales. Una vez creada y validada, teniendo en cuentas las restricciones del modelo, la población inicial; se le asigna a cada individuo el valor correspondiente de la función objetivo o peso de cada individuo.

Una vez asignado estos pesos, se procede a seleccionar los mejores p individuos que serán utilizados como reproductores y se encargarán de generar la siguiente generación de la población. Para esta etapa del proceso, la selección de padres se realiza mediante la técnica de selección por torneo que consiste en realizar la selección en base a comparaciones directas entre individuos. Para este caso, se seleccionaron al azar 2 individuos y teniendo en cuenta su valor de función objetivo, se selecciona el mejor como reproductor.

Habiendo seleccionado los reproductores, el siguiente paso consiste en realizar el proceso de reproducción. Para ello, en este trabajo se realizó teniendo en cuenta el proceso de cruce uniforme. La técnica implica la generación de una máscara de cruce con valores binarios. Si en una de las posiciones de la máscara hay un 1, el gen situado en esa posición en uno de los descendientes se copia del primer reproductor. Si por el contrario hay un 0 el gen se copia del segundo reproductor. Para producir el segundo descendiente se intercambian la interpretación de los unos y los ceros de la máscara de cruce.

Una vez obtenido los individuos descendientes, se procede a realizar el proceso de mutación. Cada uno posee una probabilidad t de mutar. En caso de requerir mutación, se determina al azar uno de los genes y teniendo en cuenta las fórmulas utilizadas para la generación de la población inicial, se genera nuevamente un valor para dicho gen reemplazado. Finalizado este proceso, habiendo realizado la mutación o no, se debe verificar cada individuo generado en cuanto a las restricciones del problema.

Cuando todos los individuos de la nueva generación fueron generados y validados, es necesario modificar de la población aquellos individuos con valores mayores para la función objetivo por los nuevos, siempre y cuando se cumpla que la función del nuevo individuo sea mejor que el individuo, caso contrario no posee sentido realizar el reemplazo por un individuo “peor” que el ya tenemos. Este proceso se repite un número determinado de repeticiones, después de las cuales el algoritmo finaliza la ejecución y se retorna el mejor individuo de la población. Los parámetros utilizados para este caso fueron:

Parámetro	Valor
Tamaño de la Población	40 individuos
Cantidad de Reproductores	16 reproductores
Probabilidad de Mutación	0.05

Tabla 1. Parámetros utilizados en el Algoritmo Genético

Optimización por Enjambre de Abejas: El algoritmo de colonia artificial de abejas (ABC), está basado en el comportamiento de forrajeo de las abejas, y diseñado originalmente para problemas de optimización numérica sin restricciones, aunque puede ser utilizado para resolver diversos problemas de optimización combinatoria.

El proceso de búsqueda de néctar por parte de las abejas es un proceso de optimización, y el comportamiento de éstas se modeló como una heurística de optimización basada en el modelo biológico que consta de los siguientes elementos:

- Fuentes de alimento: aunque el valor de una fuente de alimento depende de muchos factores, es resumido en un valor numérico que indica su potencial.
- Abejas recolectoras empleadas: estas abejas explotan una fuente de alimento, también son las encargadas de comunicar su ubicación y rentabilidad a las abejas observadoras.
- Abejas recolectoras desempleadas: este tipo de abejas se encuentran buscando fuentes de alimento para explotar.

Para este problema el algoritmo planteado consiste en lo siguiente; como primer paso para poder plantear el algoritmo que permita solucionar el problema, consiste en definir el tamaño de la población para este caso consiste en definir el número de fuente de alimentos como así también la estructura de cada una de estas fuentes.

Al igual que el caso anterior, cada una de las fuentes de alimento será un vector de 18 dimensiones, donde cada una de estas dimensiones corresponden a cada una de las fuentes de energías descritas en la sección *Datos Utilizados*, estos valores fueron generados teniendo en cuenta las fórmulas descritas en la sección de *Simulación de valores iniciales*.

Las abejas empleadas actualizan la presente solución basándose en la información de las experiencias individuales y el valor de aptitud de la solución recién encontrada. Si encuentran una solución con menor costo, está será la que reemplace a la solución actual. Para la actualización de posición para la j -ésima dimensión del i -ésimo candidato, se tiene en cuenta la siguiente ecuación:

$$V_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (8)$$

Donde,

$\varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj})$ representa el tamaño del paso entre dos soluciones determinadas.

Por otro lado, debemos considerar a las abejas espectadoras que tendrán como objetivo el cálculo de la probabilidad de selección de cada fuente de alimento generada por la abeja empleada. Para ello, el número de fuentes de alimento para la abeja espectadora es el mismo que el empleado. Durante esta fase, todas las abejas empleadas comparten información sobre la aptitud de las nuevas fuentes de alimentos con las abejas espectadoras. El espectador selecciona la mejor fuente de alimento más apta. Para ello se considera la utilización de la siguiente ecuación.

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum fit_i} \quad (9)$$

Donde para realizar este cálculo se tiene en cuenta la sumatoria de las todas las funciones objetivas y la función objetivo de la solución en cuestión. Por último, si la ubicación de una fuente de alimento no se actualiza para un número predefinido de ciclos, entonces se asume que la fuente de alimento se descuida y se inicializa la fase de abejas exploradoras. Durante esta fase, la abeja asociada con la fuente de alimento olvidada se convierte en abeja exploradora y la fuente de alimento es reemplazada por la fuente de alimento elegida arbitrariamente dentro del espacio de búsqueda. En este caso, se definió un límite de rechazo que se utiliza como parámetro de control. Cuando se llega a este límite las abejas exploradas generan aleatoriamente una nueva fuente de alimento. Este proceso se repite hasta

completar un número fijo de iteraciones, que es lo que se definió como criterio de parada. Donde los parámetros utilizados para este caso fueron:

Parámetro	Valor
Número de fuente de Alimentos	30
Número de abejas espectadoras/observadoras	12
Número de abejas empleadas	20
Variable de control (error tolerable)	0.01

Tabla 2. Parámetros utilizados en el Algoritmo Colonia de Abejas

DATOS UTILIZADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Datos utilizados: Teniendo en cuenta (Potencia Instalada | Renovables) donde se describen los potenciales energéticos para cada una de las regiones del país, solo se tienen en cuenta el potencial energético de la región NOA. Cabe aclarar que el estudio se centra en la Ciudad de Salta, sin embargo, se consideran los potenciales energéticos de la región NOA, primero porque es la región a la cual pertenece la población bajo estudio y segundo porque los costos de traslado desde otras regiones del país, volvería inviable cualquier proyecto. La siguiente tabla resume los costos totales asociados a cada una de las fuentes. Para realizar estos cálculos fue necesario considerar los costos promedio para cada uno de los casos. La información de la tabla 3, fue recopilada a partir de los siguientes links:

- Precio adjudicado del programa renovar – Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina. (Ministerio de Energía y Minería)
- Síntesis mensual de CAMMESA. Para el mes de noviembre de 2020 (último informe elaborado al momento de confección de este trabajo). (Síntesis Mensual)
- Valores históricos del precio de dólar (para el mes de noviembre de 2020) del Banco Nación de la República Argentina. (Banco de la Nación Argentina)

Tecnología	Provincia	Oferente	Potencia [MW]	Costo Total [\$/MWH]
Solar	Catamarca	Energías Sustentables (Fiambalá)	11	1067,2
		Alejandro Ivanissevich (Tinogasta)	15	1413,2
		Energías Sustentables (Saujil II)	20	1845,7
		Energías Sustentables (Saujil)	22,5	2061,95
		Latinoamericana de Energía S.A. (Los Zorritos)	49,5	4397,45
		Latinoamericana de Energía S.A. (La Pirka)	100	8765,7
		Energías Sustentables (Tinogasta II)	6,96	717,74
	La Rioja	Fidex Group S.A. (Nonogasta)	35	3143,2
		Nonogasta Solar S.A. (Nonogasta II)	20,04	1849,16
		Energías Sustentables S.A. (Nonogasta IV)	1	202,2
	Jujuy	Jemse (Cauchari 1,2,3)	300	26065,7
	Salta	Isolux Ingeniería S.A. (Cafayate)	80	7035,7
		Neoen SAS (Altiplano I)	100	8765,7
Fieldfare/Isolux (Puna)		100	8765,7	
Santiago del Estero	Deykoll Company S.A. (Añatuya I)	6	634,7	
Eólica	La Rioja	Parque Eólico Arauco (Etapa 1 - 6)	294,75	25611,575
Biomasa	Tucumán	Compañía Inversora Industrial S.A.	2	288,7
Fuentes No Renovables				4161,7

Tabla 3. Resumen de costos y potencias por fuente de energía

Resultados Obtenidos: Considerando los consumos eléctricos mensuales que se muestran en la tabla 4, se realiza las comparaciones de los algoritmos desarrollados contra los modelos existentes en la literatura para validar estadísticamente los resultados obtenidos. Estos datos fueron simulados teniendo en cuenta el modelo de red neuronal desarrollado por el autor.

Los resultados que se muestran en las siguientes tablas corresponden al porcentaje de utilización de cada una de las fuentes descritas en la tabla 3, con el objetivo de suplir la demanda eléctrica del mes bajo estudio y observado en la tabla 4. A modo de simplificar la nomenclatura de las siguientes tablas, se utilizará la siguiente notación:

- AG, representa Algoritmo genético
- CA, representa Colonia de Abejas
- (1) al (18), representan cada una de las fuentes mencionadas en la tabla 3.

Las tablas que se presentan a continuación son una muestra de los resultados arrojados por los algoritmos planteados por el autor como los softwares de la literatura, por cuestiones de espacio y para no abrumar la lectura de este trabajo no se colocaron todas, pero las restantes no presentan variaciones. Cada tabla presenta los porcentajes en lo que deberían ser utilizadas cada una de las fuentes enunciadas en la tabla 3, para suplir la demanda provista en la tabla 4. Cada fila representa los resultados arrojados por un algoritmo o uno de los softwares de comparación.

Desde el punto de vista estadístico, se procedió a calcular el error cuadrático medio, para comparar cada uno de los algoritmos desarrollados contra los resultados arrojados por Homero y HybSim, además de comparar los resultados obtenidos entre los ambos algoritmos.

Mes	Enero	Febrero	Marzo
Consumo Eléctrico [MWH]	427895,12	376799,31	402933,91

Tabla 4. Valores de consumos eléctricos utilizados para ejecutar los algoritmos

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
AG	1%	0%	0%	6%	4%	4%	0%	5%	2%	1%	9%	5%	5%	5%	2%	5%	0%	44%
CA	1%	2%	2%	4%	5%	3%	1%	6%	2%	1%	8%	6%	5%	5%	1%	6%	1%	41%
Homero	1%	1%	1%	5%	5%	4%	1%	7%	3%	0%	9%	5%	6%	5%	1%	6%	0%	41%
HybSim	0%	1%	1%	5%	3%	3%	1%	7%	2%	1%	9%	4%	5%	4%	2%	7%	1%	43%

Tabla 5. Valores arrojados por los algoritmos desarrollados y por la literatura, para el mes de enero

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
AG	0%	1%	2%	5%	5%	3%	1%	7%	3%	0%	10%	6%	6%	6%	2%	7%	0%	39%
CA	2%	1%	2%	5%	3%	4%	0%	7%	3%	1%	9%	5%	5%	4%	1%	7%	1%	41%
Homero	2%	1%	1%	5%	5%	5%	1%	5%	3%	0%	10%	5%	5%	5%	2%	6%	0%	41%
HybSim	0%	1%	1%	4%	5%	3%	1%	5%	3%	1%	9%	5%	5%	6%	2%	8%	0%	42%

Tabla 6. Valores arrojados por los algoritmos desarrollados y por la literatura, para el mes de febrero

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
AG	0%	1%	2%	5%	5%	5%	1%	5%	3%	0%	8%	4%	4%	4%	1%	7%	1%	45%
CA	0%	0%	1%	4%	3%	4%	1%	5%	2%	0%	10%	5%	5%	4%	2%	5%	0%	47%
Homero	2%	1%	1%	5%	4%	3%	0%	8%	2%	0%	8%	5%	6%	4%	2%	7%	1%	41%
HybSim	1%	1%	1%	5%	5%	3%	0%	4%	2%	1%	9%	6%	5%	4%	1%	7%	0%	45%

Tabla 7. Valores arrojados por los algoritmos desarrollados y por la literatura, para el mes de marzo

Por otro lado, el error cuadrático medio mensual, para la comparación entre el algoritmo genético y Homero es de 0.0327, mientras que el error cuadrático medio mensual entre el algoritmo genético y

HybSim es de 0.0279. Por otro lado, los errores cuadráticos medios mensual entre el algoritmo basado en colonia de abejas y Homero y Colonia de Abejas y HybSim fueron de 0.1572 y 0.1576, respectivamente. Mientras que el error cuadrático medio mensual entre ambos algoritmos fue de 0.028.

Las ejecuciones de estos algoritmos fueron realizadas en una computadora que cuenta con procesador AMD Ryzen 5 3500U de 2.10 GHz y 8 GB de memoria RAM. Además, al ser soluciones que requieren generación aleatoria de los valores, el tiempo computacional, ronda los tres minutos para la generación de los valores iniciales y consume entre 2 y 3 minutos (metaheurístico algoritmo genético) y 2 a 2.5 minutos (metaheurística colonia de abejas), para ejecutar un ciclo del algoritmo.

CONCLUSIONES

Se han propuesto dos modelos de optimización de despacho de energías renovables, uno basado en la heurística de algoritmo genético y el otro basado en enjambre de abejas. A partir de los resultados obtenidos de los errores cuadráticos medios mensuales, podemos concluir que entre los dos algoritmos planteados no existe mucha diferencia entre los resultados arrojados. Sin embargo, comparando contra modelos de la literatura, podemos concluir que el algoritmo genético proporciona soluciones óptimas mejores que el algoritmo basado en colonia de abejas.

Por otro lado, desde el punto de vista de tiempos computacionales, se pueden concluir que los tiempos necesarios para la ejecución del algoritmo se encuentran dentro de los límites tolerables enunciados en la literatura. Por todo esto, es que podemos concluir que los algoritmos desarrollados en el presente trabajo contribuyen un aporte significativo para modelar la optimización del despacho de energía eléctrica para la Ciudad de Salta.

REFERENCIAS

- Banco de la Nación Argentina – Dirección URL: <https://www.bna.com.ar/Personas> [Consulta: 20 de febrero de 2021]
- Bekele, G., Palm, B. (2010). Feasibility study for a standalone solar-wind-based hybrid energy system for application in Ethiopia. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.006>.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press.
- Isherwood, W., Smith, J. R., Aceves, S. M., Berry, G., Clark, W., Johnson, R., Seifert, R. (2000). Remote power systems with advanced storage technologies for Alaskan villages. *Energy*. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(00\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(00)00028-1).
- Ministerio de Energía y Minería – Dirección URL: <https://www.minem.gob.ar/www/833/25871/precios-adjudicados-del-programa-renovar> [Consulta: 20 de febrero de 2021]
- Mizani, S., Yazdani, A. (2009). Design and operation of a remote microgrid. In *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*. <https://doi.org/10.1109/IECON.2009.5414925>.
- Muhamad Razali, N. M., Hashim, A. H. (2010). Backward reduction application for minimizing wind power scenarios in stochastic programming. In *PEOCO 2010 - 4th International Power Engineering and Optimization Conference, Program and Abstracts*. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2010.5559252>.
- Potencia Instalada | Renovables - Dirección de URL: <https://despachorenovables.cammesa.com/potencia-instalada/> [Consulta: 25 de enero de 2021]
- Prodromidis, G. N., Coutelieris, F. A. (2010). Simulation and optimization of a stand-alone power plant based on renewable energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.065>.
- Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M. (2010). Study of a solar PV-diesel-battery hybrid power system for a remotely located population near Rafha, Saudi Arabia. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.025>.

- Rehman, S., El-Amin, I. M., Ahmad, F., Shaahid, S. M., Al-Shehri, A. M., Bakhashwain, J. M., Shash, A. (2007). Feasibility study of hybrid retrofits to an isolated off-grid diesel power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.05.003>.
- Shaahid, S. M., Elhadidy, M. A. (2007). Technical and economic assessment of grid-independent hybrid photovoltaic-diesel-battery power systems for commercial loads in desert environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.001>.
- Silva, S. B., de Oliveira Marco, M. A. G., Severino, M. M. (2010). Economic evaluation and optimization of a photovoltaic-fuel cell-batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon. *Energy Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.041>.
- (Síntesis Mensual – Dirección Url:
<https://portalweb.cammesa.com/MNet1/Pages/Informes%20por%20Categor%C3%ADa%20Publico/Varios/Sintesis%20Mensual.aspx> [Consulta: 20 de febrero de 2021]
- Türkay, B. E., Telli, A. Y. (2011). Economic analysis of standalone and grid connected hybrid energy systems. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.12.007>.
- Zoulias, E. I., Lymberopoulos, N. (2007). Techno-economic analysis of the integration of hydrogen energy technologies in renewable energy-based stand-alone power systems. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.02.005>.

HEURISTIC COMPARISON TO OPTIMIZE THE DISPATCH OF ELECTRICAL ENERGY, FOR THE CITY OF SALTA

ABSTRACT: Nowadays, non-renewable resources are those that are at the forefront for the generation of electrical energy, while they begin to develop renewable projects to be able to somehow mitigate the impact on the environment that brings about the use of conventional fonts. However, when we consider renewable sources, there are several variables that we must consider the most important being the cost of generation and transfer. That is why, it is necessary to have a combinatorial optimization model, to determine the optimal solution that allows the use of non-renewable resources such as renewable ones, reducing the environmental impact at the lowest possible cost. To provide a solution to this model, two heuristics are proposed and compared, one based on a swarm of bees and the other based on a genetic algorithm of natural selection for the growth of a population. From the comparison of the other data in the literature, it can be concluded that both proposed models provide feasible solutions for the problem addressed.

KEYWORDS: Renewable Energies, Combinatorial Optimization, Genetic Algorithm, Swarm of Bees.