

UN ENFOQUE HÍBRIDO PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS. APLICACIÓN PARA LA CIUDAD DE SALTA ARGENTINA

Zanek, F.¹; Xamena, E.¹

¹Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, UNSa
e-mail:: zanekfranco@gmail.com

Recibido 18/04/2024; Aceptado 30/07/2024

RESUMEN.- Este artículo presenta un enfoque híbrido para la integración de energías renovables en sistemas eléctricos, que combina la simulación de valores iniciales con la metaheurística de Colonia de Abejas. Se revisan las estrategias de optimización existentes y se resaltan los desafíos y oportunidades en la optimización de sistemas energéticos sostenibles. El enfoque propuesto tiene como objetivo maximizar la utilización de energías renovables y minimizar la dependencia de combustibles fósiles en la generación de electricidad, contribuyendo a la transición hacia una matriz energética más limpia, diversificada y eficiente. Se discuten las implicaciones de este enfoque para dicha transición y se subraya la importancia de desarrollar modelos matemáticos que simulen y optimicen sistemas energéticos a gran escala para reemplazar las tecnologías basadas en combustibles fósiles con energías renovables. Este enfoque ofrece perspectivas prometedoras para la planificación y operación de sistemas energéticos sostenibles, prueba de esto es la aplicación exitosa al caso de estudio centrado en la Ciudad de Salta.

Palabras clave: Optimización energética, Colonia de Abejas, Sistemas de Energías Renovables.

A HYBRID APPROACH FOR THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGIES IN ELECTRICAL SYSTEMS. APPLICATION FOR THE CITY OF SALTA ARGENTINA

ABSTRACT.- This article presents a hybrid approach for integrating renewable energies into electrical systems, which combines the simulation of initial values with the Bee Colony metaheuristic. Existing optimization strategies are reviewed and the challenges and opportunities in optimizing sustainable energy systems are highlighted. The proposed approach aims to maximize the use of renewable energies and minimize dependence on fossil fuels in electricity generation, contributing to the transition towards a cleaner, diversified, and efficient energy matrix. The implications of this approach for such a transition are discussed, emphasizing the importance of developing mathematical models that simulate and optimize large-scale energy systems to replace technologies based on fossil fuels with renewable energies. This approach offers promising perspectives for planning and operating sustainable energy systems, proof of this is the successful application to the case study focused on the City of Salta.

Keywords: energy optimization, Bee Colony, Renewable Energy Systems

1. INTRODUCCIÓN

La integración de energías renovables en sistemas eléctricos es un tema de gran relevancia en el contexto actual, dada la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además que las energías renovables ofrecen la oportunidad de diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Para lograr una integración eficiente de las energías renovables en los sistemas eléctricos, es necesario superar por un lado varios desafíos técnicos, económicos y regulatorios. Mientras que por el otro, es necesario optimizar la ubicación y dimensionamiento de los sistemas de generación renovable para garantizar una producción adecuada de electricidad.

Las estrategias de optimización existentes han demostrado ser útiles en la integración de energías renovables, pero presentan ciertas

limitaciones que pueden dificultar su aplicación en sistemas eléctricos complejos. Estas limitaciones incluyen la complejidad computacional, la falta de consideración de las características dinámicas del sistema y la incapacidad de manejar eficientemente múltiples objetivos de optimización.

Es por esto que, diversos enfoques y estrategias se han propuesto para abordar este desafío y avanzar hacia un sistema energético más sostenible y limpio. Entre las estrategias de optimización existentes, destacan aquellas basadas en la simulación de valores iniciales y las metaheurísticas. El enfoque híbrido presentado en este artículo busca ofrecer una solución innovadora mediante la combinación de la simulación de valores iniciales con la metaheurística de Colonia de Abejas. Esta combinación pretende aprovechar las ventajas de ambas técnicas, permitiendo una optimización más eficiente y precisa en la integración de energías renovables en sistemas eléctricos. Diversos estudios han señalado la importancia de desarro-

lar estrategias de optimización efectivas para maximizar el uso de energías renovables y reducir la dependencia de combustibles fósiles en la generación de electricidad. En este sentido, el enfoque híbrido propuesto no solo busca maximizar la utilización de energías renovables, sino también minimizar la huella ambiental asociada a la generación de energía eléctrica. Además, es crucial considerar las implicaciones de este enfoque para la transición hacia una matriz energética más limpia, diversificada y eficiente. La implementación de estrategias de optimización como la propuesta en este artículo podría tener un impacto significativo en la transformación del sector energético hacia fuentes de energía más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

Actualmente, existen varias estrategias de optimización utilizadas para abordar la integración de energías renovables en sistemas eléctricos. Algunas de estas estrategias incluyen la programación lineal, la programación matemática y las metaheurísticas, entre otros aspectos. Estas estrategias se utilizan para optimizar diferentes aspectos del sistema eléctrico, como el dimensionamiento de los componentes, la programación y operación de la generación y el almacenamiento de energía, y la gestión de la demanda.

El enfoque híbrido presentado en el artículo ofrece una solución innovadora para la integración de energías renovables en sistemas eléctricos. Este enfoque combina la simulación de valores iniciales con la metaheurística de Colonia de Abejas, permitiendo una optimización más eficiente y precisa. Sin embargo, es importante destacar que este enfoque no es el único que ha sido propuesto en la literatura científica.

Para continuar avanzando en la comprensión y aplicación del enfoque, es fundamental incorporar una diversidad de fuentes bibliográficas que respalden y enriquezcan el desarrollo y análisis de este trabajo.

Al abordar la integración de energías renovables, es importante considerar las investigaciones realizadas por autores destacados en el campo de la ingeniería energética. Por ejemplo, el trabajo de Zhang (Zhang et. al., 2017) proporciona una visión detallada sobre la optimización de la ubicación y dimensionamiento de sistemas de generación renovable, lo cual podría complementar y enriquecer la comprensión de los desafíos técnicos mencionados en el artículo.

Por otro lado, para profundizar en el análisis comparativo, se puede recurrir a investigaciones como la de Gusain (Gusain et. al., 2023) que compara el rendimiento de diferentes metaheurísticas en la optimización del dimensionamiento de sistemas de generación renovable. Asimismo, la obra de Abbas (Abbas et. al., 2018) ofrece una perspectiva detallada sobre el uso del algoritmo genético en la optimización de la operación de sistemas de almacenamiento de energía, lo cual enriquecería el análisis comparativo presentado en el artículo.

También es importante considerar estudios relevantes que aborden aspectos específicos de la optimización y la gestión de la energía sostenible. Por ejemplo, el trabajo de Mechleri (Mechleri et. al., 2018) se centra en la aplicación de la programación matemática para la operación óptima de sistemas de generación distribuida, ofreciendo perspectivas valiosas sobre la eficiencia operativa de dichos sistemas.

Además de los estudios mencionados, es importante considerar la investigación realizada por Rabe (Rabe et. al., 2022) sobre la

optimización de la operación de sistemas de energía solar fotovoltaica. Este estudio proporciona información relevante sobre la aplicación de la programación lineal en la maximización del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, lo cual puede complementar el análisis del enfoque híbrido propuesto en el artículo.

El trabajo de Sinsel (Sinsel et. al., 2020), que examina la implementación de diferentes estrategias de optimización en la gestión de la interconexión de sistemas eléctricos a escala regional, ofrece una perspectiva amplia sobre los desafíos y oportunidades asociados con la integración de energías renovables en sistemas interconectados.

Asimismo, se ha demostrado que la programación matemática puede ser una herramienta efectiva en la optimización de la operación de sistemas de almacenamiento de energía, como se evidencia en el trabajo de da Silva (da Silva, et. al., 2023). Esta investigación resalta la importancia de considerar la eficiencia y rentabilidad de los sistemas de almacenamiento en la integración de energías renovables.

Una de las áreas de interés en la literatura científica es la gestión de la intermitencia de las fuentes de energía renovable. En este contexto, el trabajo de Ssekulima (Ssekulima et. al., 2016) destaca la importancia de la predicción de la generación de energía eólica y solar para mejorar la integración de estas fuentes en los sistemas eléctricos, lo cual ofrece un enfoque complementario al propuesto en este artículo.

Además, los estudios de Worighi (Worighi et. al., 2019) sobre la modelización y optimización de redes eléctricas inteligentes pueden proporcionar información valiosa sobre cómo integrar eficientemente las energías renovables en sistemas eléctricos más inteligentes y eficientes.

Asimismo, el análisis de la viabilidad económica de la integración de energías renovables es fundamental. En este sentido Ahmad (Ahmad et. al., 2021), realiza una investigación sobre la evaluación de costos y beneficios de la integración de sistemas fotovoltaicos proporciona una visión detallada de los aspectos económicos involucrados en la transición hacia energías renovables.

Otro aspecto relevante es la consideración de la resiliencia y la seguridad del sistema eléctrico en el contexto de la integración de energías renovables. El trabajo de Jesse (Jesse et. al., 2019) examina los desafíos de la operación segura y confiable de sistemas eléctricos con alta penetración de energías renovables, lo cual complementaría la discusión sobre los desafíos técnicos en la integración de energías renovables.

Además, para comprender mejor la relación entre la integración de energías renovables y la planificación energética a largo plazo, resulta relevante explorar el trabajo de Liu (Liu et. al., 2019) sobre la planificación óptima de sistemas energéticos con alta participación de energías renovables, brindando una perspectiva integral sobre los aspectos de planificación y operación en sistemas eléctricos sostenibles.

Por último, es importante tener en cuenta la opinión de expertos del campo de la ingeniería energética con respecto al enfoque híbrido propuesto. Entrevistas con profesionales reconocidos en el sector pueden enriquecer el análisis al brindar perspectivas prácticas y comentarios sobre la aplicabilidad y

posibles mejoras de esta metodología.

Al continuar explorando estas nuevas perspectivas, se ofrece la oportunidad de enriquecer aún más el campo de la optimización de sistemas energéticos, brindando mayor comprensión sobre la operación óptima de sistemas de almacenamiento de energía, la gestión de la variabilidad de la energía solar y la integración exitosa de energía eólica en redes eléctricas urbanas.

Como se puede observar con los trabajos presentados, se muestran que si bien el enfoque híbrido presenta ventajas en ciertos aspectos de la optimización de sistemas energéticos, también tiene limitaciones en comparación con otras estrategias. Por lo tanto, es crucial tener en cuenta estas comparaciones al evaluar la idoneidad del enfoque híbrido para la integración de energías renovables en sistemas eléctricos.

Por otro lado hay que considerar que, desde el punto de vista computacional, el problema planteado se clasifica como un problema NP-Hard, esto son problemas que se caracterizan por que no es posible encontrar una solución exacta, sino más bien lo que se obtienen son soluciones factibles y aproximadas a la verdadera solución. Para poder obtener estas soluciones hay diferentes enfoques a utilizar uno de ellos, el que se utiliza en este trabajo, consiste en la utilización de la metaheurística basada en colonia de abejas, la cual está basada en el comportamiento de forrajeo de las abejas y diseñado originalmente para problemas de optimización numérica sin restricciones, aunque puede ser utilizado para resolver problemas de 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:

1. 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.

2. Abejas recolectoras empleadas: estas abejas explotan una fuente de alimento, también son las encargadas de comunicar su ubicación y rentabilidad a las abejas observadoras.

3. Abejas recolectoras desempleadas: este tipo de abejas se encuentran buscando fuentes de alimento para explotar. Se dividen en dos tipos, las exploradoras que se encargan de buscar nuevas fuentes de alimento y las observadoras que esperan en la colmena para elegir alguna de las fuentes de alimento que se encuentran en un proceso de explotación por las abejas empleadas.

Estos tres elementos básicos del comportamiento de forrajeo interaccionan de la siguiente forma: las abejas empleadas comunican la información de la fuente de alimento que están explotando a las abejas observadoras por medio de una danza, donde el ángulo respecto al sol indica la dirección de la fuente y un zigzag indica la distancia, las danzas con mayor duración refieren a fuentes de alimento más rentables y probables de ser elegidas por las abejas observadoras (Gros et. al., 2004). Una vez que las fuentes de alimento han sido agotadas (ya sea por las abejas empleadas u observadoras) son abandonadas y reemplazadas por nuevas fuentes encontradas por las abejas exploradoras.

Tomando esta analogía, la optimización por colonia de abejas, consiste en determinar la mejor solución (fuente de alimento) que resuelva el problema. Para ello, las abejas exploradoras deben seleccionar las mejores soluciones teniendo en cuenta una función de probabilidad, que se encuentra asociada a cada una de las posibles soluciones. Este algoritmo itera, hasta encontrar una solución factible o bien cuando se hayan agotado la cantidad de ejecuciones del algoritmo.

El presente artículo tiene como objetivo explorar en proponer un enfoque híbrido para la integración de energías renovables en sistemas eléctricos, resaltando su potencial para abordar los desafíos actuales en la transición hacia un sistema energético más sostenible y eficiente. Para posteriormente aplicar el mismo en la optimización de del despacho de energía eléctrica, mediante fuentes renovables, y suplir la demanda eléctrica de la Ciudad de Salta.

2. METODOLOGÍA

El enfoque híbrido propuesto en este artículo combina la simulación de valores iniciales con diversas metaheurísticas para abordar la variabilidad de las energías renovables. Al integrar la simulación con técnicas de optimización basadas en inteligencia artificial, se busca mejorar la capacidad de adaptación del sistema a los cambios en la disponibilidad de energía renovable.

Este enfoque permite encontrar soluciones óptimas para la operación de sistemas eléctricos sostenibles, considerando diversos factores como la demanda energética, la capacidad de generación renovable y los costos asociados.

El proceso de desarrollo del modelo, obtención de resultados y posterior análisis de los mismos puede dividirse en las siguientes etapas:

2.1. Planteamiento del modelo matemático que permita simular el problema a estudiar – Función Objetivo

La base de todo el problema reside en el objetivo que se pretende maximizar o minimizar. En nuestro caso, lo que se busca es poder minimizar los costos de traslado y generación de las energías renovables utilizadas incluyendo además el costo de generación de la energía eléctrica por medios convencionales. Esto se puede resumir en la siguiente ecuación.

$$\min \sum C_i R_i + C_{Comb} (X - \sum R_i) \quad (1)$$

En esta última ecuación, X corresponde a la demanda eléctrica a satisfacer. C_i corresponden al costo de generación y traslado para la energía renovable i -ésima. Por otro lado, R_i corresponde a la cantidad de energía eléctrica generada por la fuente de energía i -ésima. Por último, la expresión $C_{Comb} (X - \sum R_i)$ corresponde a los costos y la cantidad de energía eléctrica generada por medio convencionales. Siendo $X - \sum R_i$ la cantidad de energía eléctrica generada por medios convencionales.

2.2. Planteamiento del modelo matemático que permita simular el problema a estudiar – Restricciones

Una vez definida la función objetivo y las variables involucradas en el proceso, es necesario determinar las restricciones matemáticas que influyen en dichas variables teniendo en cuenta el contexto del problema.

Para nuestro caso, las restricciones que se aplican las podemos dividir en 3 grupos. El primer grupo abarca las restricciones que contemplen que la cantidad de energía eléctrica generada por cada fuente no supere la demanda eléctrica a suplir. Esto se resume en la ecuación (2).

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

El segundo grupo de restricciones a tener en cuenta es la reducción del impacto en el medio ambiente de la generación de energía eléctrica. Lo que se pretende es que la generación por fuentes convencionales sea la mínima posible de tal manera que el impacto que está tenga en el medio ambiente sea lo menos posible. Esto está detallado en una ecuación (3).

$$(X - \sum R_i) * FE \leq \epsilon_{CO_2} \quad (3)$$

De esta última ecuación, FE representa factor de emisión de dióxido de carbono; y ϵ_{CO_2} , delta tolerable de emisión.

El último factor a considerar es la no negatividad de las variables como así también considerar los máximos posibles de generación para cada fuente. Esto se resume en la ecuación (4).

$$0 \leq R_i \leq R_{i\ max} \quad (4)$$

A partir de todo lo expuesto anteriormente, el modelo que permite representar el problema bajo estudio queda planteado de la siguiente manera:

$$\min \sum C_i R_i + C_{comb}(X - \sum R_i)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum R_i &\leq X \\ (X - \sum R_i) * FE &\leq \epsilon_{CO_2} \\ 0 \leq R_i &\leq R_{i\ max} \end{aligned}$$



Región	Eólica (MW)	Fotovoltaica (MW)	Hidráulica (MW)	Bioenergías (MW)	Total (MW)
NOA	158	493	119	72	842
NEA	0	0	0	89	89
CUY	0	205	184	0	389
CEN	128	61	116	32	337
LIT	0	0	2	10	12
COM	253	0	32	0	285
PAT	1063	0	47	0	1110
BAS + GBA	1124	0	0	33	1157
Total	2726	759	500	236	4221

Fig. 1: Potencial Instalado por cada región y cada tecnología (CAMMESA 2021)

2.3. Obtención de los datos

A partir de la definición del problema planteado en los apartados anteriores, es necesario definir los datos con los que vamos a alimentar el problema y de esta manera poder dar una solución al mismo.

Como el estudio se centra en la Ciudad de Salta, es importante destacar que los únicos potenciales energéticos a considerar son los de la región del NOA, dado los costos extras que supondría utilizar fuentes de energía de otras partes del país.

Estos potenciales energéticos se pueden observar en la figura 1. Los mismos fueron extraídos de la página de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima (CAMMESA). Teniendo en cuenta los programas Renovar del Ministerio de Energía, en la tabla 1 se resumen los proyectos beneficiados en la región del NOA. (Ministerio Energía, 2024).

2.4. Solución al problema

Como se mencionó anteriormente, el problema bajo estudio es un problema NP-Hard, por lo que el primer paso para poder resolver el problema, consiste en definir el algoritmo que ayude a solucionar el problema. El mismo consiste en la aplicación de la metaheurística basada en colonia de abejas. Primeramente es necesario definir el tamaño de la población

Para este caso se trata de definir el número de fuente de alimentos, como así también la estructura de cada una de estas fuentes. Cada una de ellas será un vector de diecinueve dimensiones, cada dimensión corresponde a cada una de las fuentes de energía de la tabla 1.

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

Tabla 1: Fuentes de energías renovables: Potencia y Costo de generación de la energía eléctrica

Tecnología	Provincia	Oferente	Potencia [MW]	Costo Total [USD /MWh]
Solar	Catamarca	Energías Sustentables (Fiambalá)	11	53.73
		Alejandro Ivanissevich (Tinogasta)	15	53.43
		Energías Sustentables (Saujil II)	20	41.85
		Energías Sustentables (Saujil)	22.5	51.93
		Latinoamericana de Energía S.A. (Los Zorritos)	49.5	41.76
		Latinoamericana de Energía S.A. (La Pirka)	100	42
		Energías Sustentables (Tinogasta II)	6.96	41.7
	La Rioja	Fidex Group S.A. (Nonogasta)	35	56.43
		Nonogasta Solar S.A. (Nonogasta II)	20.04	41.76
		Energías Sustentables S.A. (Nonogasta IV)	1	40.44
	Jujuy	Jemse (Cauchari 1,2,3)	300	180
	Salta	Isolux Ingeniería S.A. (Cafayate)	80	56.28
		Neoen S.A. (Altiplano I)	100	40.8
		Fieldfare/Isolux (Puna)	100	58.98
	Santiago del Estero	Deykoll Company S.A. (Añatuya I)	6	57.27
Eólica	La Rioja	Parque Eólico Arauco (Etapa 1-6)	294.75	171.24
Biomasa	Tucumán	Compañía Inversora Industrial S.A.	1	145.86
		GENNEIA S.A.	19	106.73
Fuentes No Renovables				1149.13

la actualización de posición para la j-ésima dimensión del i-ésimo candidato, se tiene en cuenta la ecuación (5).

$$V_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij} * (x_{ij} - x_{kj}) \quad (5)$$

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 fuente de alimento más apta. Para ello se considera la utilización de la ecuación (6).

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum fit_i} \quad (6)$$

Para realizar este cálculo se tiene en cuenta la sumatoria de todas las funciones objetivos 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 inicia 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 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.

Para este algoritmo, se utilizaron los parámetros propuestos en la tabla 2. Estos valores surgen de los valores propuestos por la literatura, sumado a experimentos de prueba de error, utilizados para definir los valores óptimos para el problema.

Tabla 2: Parámetros utilizados en el algoritmo

Parámetro	Valor Definido
Número de Fuente de alimentos	30
Número de abejas espectadoras/observadoras	12
Número de abejas empleadas	20
Variable de control (error tolerable)	0.01
Número de ejecuciones	200 repeticiones

2.5 Simulación de valores iniciales

Hasta el momento se describió el algoritmo a utilizar, el origen y la estructura de los datos; sin embargo para poder iniciar el algoritmo es necesario simular utilizando diferentes ecuaciones matemáticas los valores iniciales para las distintas fuentes de energía renovable. Es por eso que en el siguiente apartado se describen los mecanismos que permiten este procedimiento. Para este caso se tienen en cuenta sólo aquellas fuentes de fácil acceso y cuya explotación es factible dentro del territorio de interés.

Turbinas de Viento: La energía resultante de una turbina eólica se calcula mediante la siguiente ecuación matemática

$$E_{WG}(t) = \begin{cases} 0, & v < V_c \\ \frac{1}{2} C_p \rho A_{WG} v^3(t) \Delta t, & V_c < v < V_r \\ P_{WG,r}, & V_r < v < V_f \\ 0, & v > V_f \end{cases} \quad (7)$$

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 considera 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 ecuación (8).

$$E_{PV}(t) = (\eta_{PV} A_{PV}) * I_T(t) \quad (8)$$

De dónde, $I_T(t)$ es la radiación solar total por hora sobre una superficie inclinada, η_{PV} es la eficiencia de los módulos fotovoltaicos y 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 25%. Este valor surge de la evaluación de diferentes tipos de módulos fotovoltaicos y sus eficiencias típicas y las consideraciones de los factores de la región NOA del país.

Biomasa: La energía solar así transformada por las plantas, se transfiere posteriormente a los animales a través de cadenas tróficas. El reino animal incorpora, transforma y modifica la energía química contenida en las plantas. En este proceso se generan subproductos que no tienen valor para la cadena nutritiva o no sirven para la fabricación de productos de mercado, pero que pueden utilizarse como combustible en diferentes aprovechamientos energéticos. En este contexto, la producción de energía a partir de la biomasa está basada en la utilización de los materiales residuales producidos por los animales y las plantas e incluso las mismas como tales, para la obtención de energía a partir de diferentes procesos de transformación.

Los modelos matemáticos que permiten evaluar el potencial energético de biomasa se fundamentan en la ecuación (9). Los valores a introducir en cada variable dependen del material de biomasa que se esté utilizando.

$$PE = M_{bs} * E \quad (9)$$

En esta última ecuación, PE representa el potencial energético de la biomasa considerada, medida en TJ/año. Por otro lado la masa de residuo seco se encuentra representada por la variable M_{bs} , la cual esta medida en toneladas por año. E representa la energía de residuo seco, que es equivalente al llamado Poder Calorífico Inferior (PCI) medida en TJ/año.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Considerando los valores presentados en la Tabla 1 y tomando en cuenta un límite aceptable de emisiones de CO₂ de 1850 kg/año, se procede a validar el modelo de optimización propuesto para la gestión de energías renovables destinadas a cubrir la demanda eléctrica de la Ciudad de Salta. Los datos mensuales de consumo eléctrico requerido, utilizados como entrada para las heurísticas propuestas, se obtuvieron mediante herramientas y métodos desarrollados por el autor, basados en técnicas de aprendizaje automático y redes neuronales. Para demostrar la eficacia del algoritmo, se generaron utilizando una red neuronal definida por los autores, valores mensuales de consumo eléctrico para la ciudad, estos se resumen en la Tabla 3. Se eligieron estos meses, dado que son los meses donde la demanda eléctrica es mayor.

Tabla 3: Valores de demanda eléctrica utilizados como valores de entrada del algoritmo.

Mes	Consumo Eléctrico[MWh]
Enero	427895.12
Abril	376799.31
Julio	402933.91
Noviembre	395685.42

Las Tablas 4 a 7, junto con las figura 2 a 5, que se encuentran en el apéndice A, ofrecen una detallada comparación de los resultados obtenidos entre el algoritmo propuesto y los software de referencia utilizados en la literatura. Cada fila de estas tablas proporciona información crucial sobre cómo deberían ser asignadas las fuentes de energía mencionadas en la Tabla 1 para satisfacer las demandas eléctricas especificadas en la Tabla 3. Esto implica determinar los porcentajes ideales de utilización de cada fuente,

Tabla 4: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Enero

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19
CA	1%	2%	2%	4%	5%	3%	1%	6%	2%	1%	8%	6%	5%	5%	1%	6%	1%	2%	40%
HO	1%	1%	1%	5%	5%	4%	1%	7%	3%	0%	9%	5%	6%	5%	1%	6%	0%	3%	40%
HY	0%	1%	1%	5%	3%	3%	1%	7%	2%	1%	9%	4%	5%	4%	2%	7%	1%	2%	43%

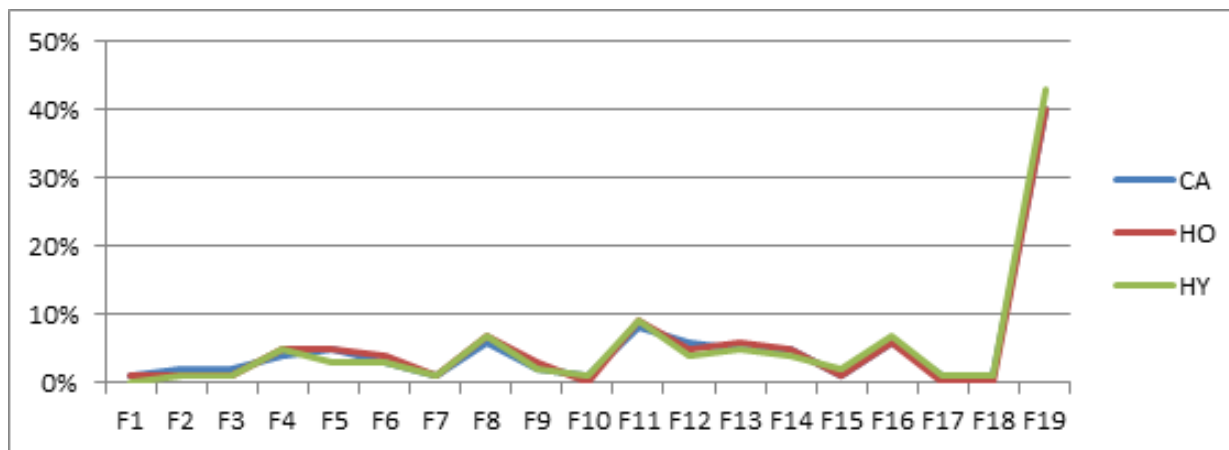


Fig. 2: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Enero

considerando las restricciones del modelo y su objetivo principal de minimizar el impacto ambiental asociado a la generación de energía eléctrica. Para este estudio, se optó por analizar el consumo eléctrico a nivel mensual debido a la limitada variabilidad estadística de un modelo de generación eléctrica a nivel horario o diario.

En cada figura, se presentan las siglas correspondientes a los resultados obtenidos por el algoritmo de colonia de abejas propuesto (CA), los resultados proporcionados por el software Homero (HO) y los resultados derivados del software HybSim (HY). Además, se identifican las fuentes renovables (F1-F18) mencionadas en la Tabla 3, cada una representando una opción potencial para la generación de energía limpia.

Desde una perspectiva estadística, se llevó a cabo el cálculo del error cuadrático medio para comparar los resultados de cada uno de los algoritmos desarrollados con los resultados obtenidos mediante el uso de Homero y HybSim.

Los errores cuadráticos medios de las comparaciones entre los resultados del algoritmo basado en la Colonia de Abejas propuesto y los resultados de los softwares Homero y HybSim fueron los siguientes, respectivamente:

- Para el mes de Enero, los errores fueron de 0.1572 y 0.1576, respectivamente.
- En el mes de Abril, los errores fueron de 0.2256 y 0.1756.
- En Julio, los errores fueron de 0.125 y 0.13.
- Por último, en Noviembre, los errores fueron de 0.136 y 0.141.

Es importante tener en cuenta que, debido a la naturaleza de las soluciones que implican la generación aleatoria de valores, el tiempo computacional asociado es significativo.

Tabla 5: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Abril

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19
CA	2%	1%	0%	3%	4%	2%	0%	7%	2%	0%	8%	4%	7%	3%	1%	4%	1%	2%	49%
HO	1%	0%	1%	4%	6%	3%	0%	7%	3%	0%	9%	3%	5%	5%	1%	4%	0%	1%	47%
HY	1%	2%	1%	2%	3%	2%	0%	7%	2%	0%	8%	5%	6%	6%	1%	4%	1%	2%	47%

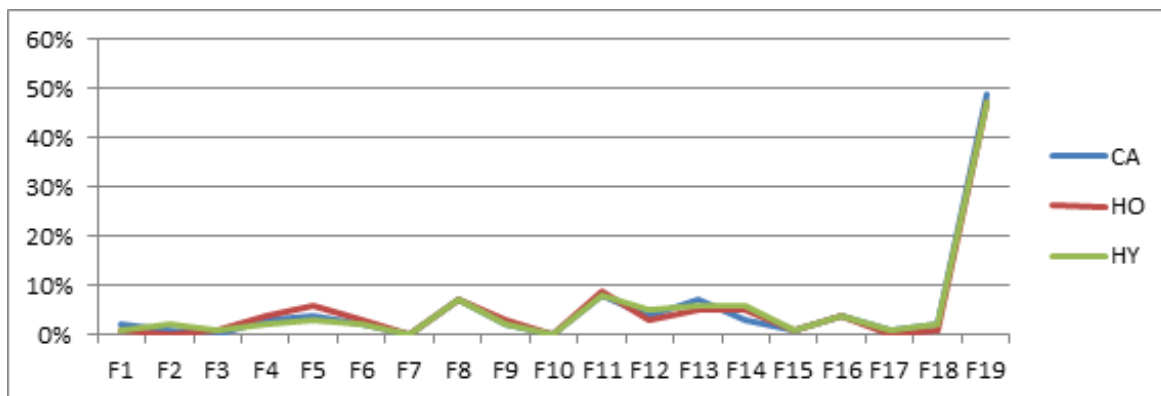


Fig. 3: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Abril

Tabla 6: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Julio

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19
CA	3%	2%	1%	2%	3%	0%	2%	6%	3%	2%	7%	3%	8%	3%	2%	4%	0%	0%	49%
HO	2%	1%	0%	1%	4%	1%	2%	5%	2%	2%	6%	4%	8%	4%	3%	5%	1%	1%	48%
HY	2%	1%	0%	3%	4%	1%	1%	5%	2%	2%	5%	4%	8%	4%	3%	4%	1%	2%	48%

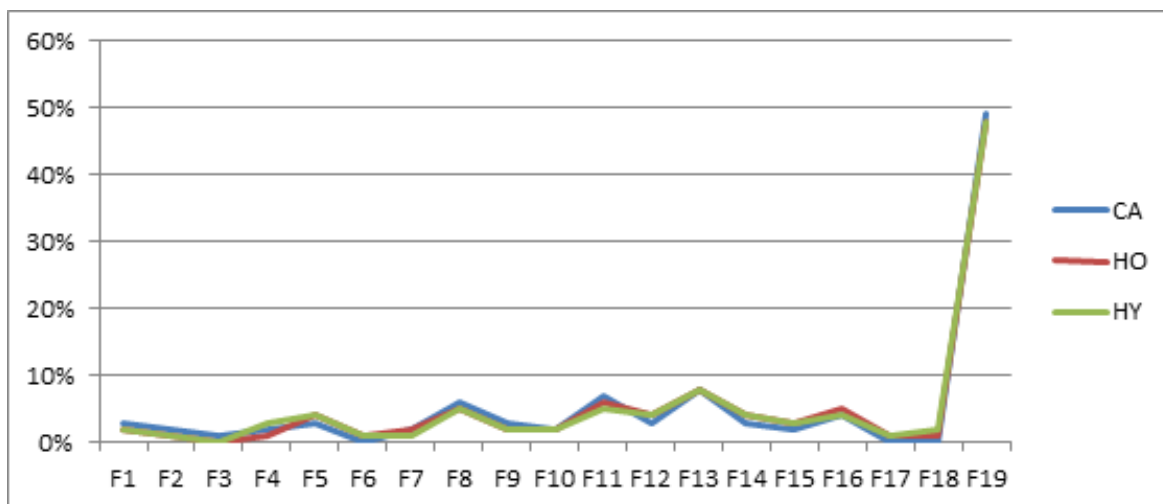


Fig. 4: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Julio

Tabla 7: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Noviembre

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19
CA	1%	3%	2%	1%	2%	2%	4%	3%	4%	2%	8%	3%	8%	2%	1%	3%	2%	1%	48%
HO	3%	3%	3%	2%	2%	1%	3%	2%	3%	0%	7%	3%	9%	2%	2%	3%	2%	2%	48%
HY	3%	2%	2%	0%	2%	2%	1%	3%	4%	1%	8%	3%	8%	3%	2%	4%	2%	2%	48%

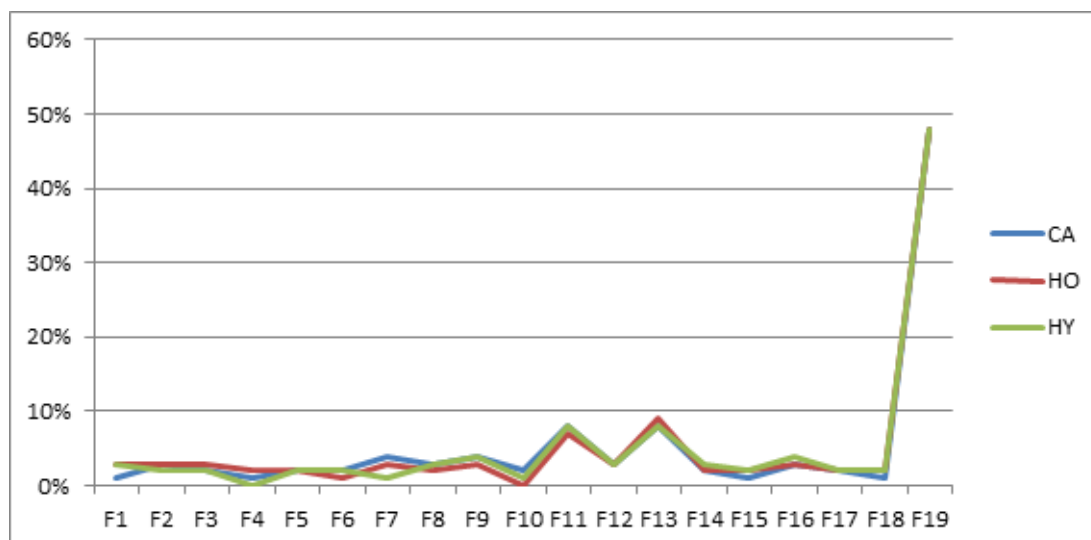


Fig. 5: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Noviembre

La generación de una población inicial toma alrededor de cinco minutos, mientras que la validación de las restricciones y las correcciones de las soluciones locales obtenidas consumen aproximadamente entre 120 y 150 segundos, dependiendo de los valores involucrados. Además, la ejecución completa de un ciclo del algoritmo propuesto, requiere entre 10 y 15 minutos. Estos tiempos se tomaron en consideración en base a la ejecución de los modelos en una computadora equipada con un procesador AMD Ryzen 5 3500U de 2.10 GHz y 8 GB de memoria RAM.

4. CONCLUSIONES

Abordar los desafíos asociados con la integración de energías renovables implica una tarea multidimensional que va más allá de la simple implementación de tecnologías limpias. Es esencial considerar una gama de factores, desde la variabilidad inherente de las fuentes renovables hasta las implicaciones económicas, sociales y regulatorias de su integración en los sistemas eléctricos existentes. En este contexto, el enfoque híbrido propuesto en este estudio se destaca como una contribución significativa y novedosa a la literatura del tema.

Los resultados de la aplicación del modelo planteado son prometedores desde el punto de vista estadístico, considerando los valores obtenidos en la sección anterior. Este enfoque ha demostrado su eficacia mediante la comparación de los resultados obtenidos con los de otros modelos ampliamente reconocidos en la literatura, como Homero y HybSim. La evaluación estadística, en particular mediante el cálculo del error cuadrático medio, proporciona una medida objetiva de la precisión y la fiabilidad del modelo propuesto en la predicción y gestión de la demanda eléctrica.

Además, es importante resaltar que este modelo representa un avance significativo en el campo de la optimización del despacho de energías renovables. Su enfoque híbrido, que combina técnicas de simulación de valores iniciales con la aplicación de la metaheurística basada en Colonia de Abejas, ofrece una nueva perspectiva para abordar los desafíos de la integración de energías limpias en sistemas eléctricos complejos. La capacidad de considerar múltiples fuentes de energía renovable y optimizar su uso de manera eficiente y sostenible lo convierte en una herramienta poderosa para los planificadores energéticos y los responsables de la toma de decisiones.

En resumen, el modelo propuesto en este estudio representa un avance significativo en la literatura del tema al ofrecer una solución innovadora y efectiva para los desafíos de la integración de energías renovables en sistemas eléctricos. Su validación estadística y su capacidad para abordar aspectos técnicos, económicos y sociales lo posicionan como una herramienta invaluable para avanzar hacia un futuro energético más sostenible y resiliente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de mis tutores y la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima (CAMMESA) por el continuo soporte para la obtención de los datos y ayuda para poder realizar un trabajo desde el punto de vista estadístico válido, novedoso y que es un aporte para la literatura del tema.

REFERENCIAS

- Abbas F., Habib S., Feng D. y Yan Z. (2018). Optimizing generation capacities incorporating renewable energy with storage systems using genetic algorithms. *Electronics*, 7(7), 100.
- Ahmad T. y Zhang D., 2021. Renewable energy integration/techno-economic feasibility analysis, cost/benefit impact on islanded and grid-connected operations: A case study. *Renewable Energy*, 180, 83-108.
- CAMMESA – Potencia Instalada | Renovables (<https://despacho-renovables.cammesa.com/potencia-instalada/>) (06-04-2024)
- da Silva D. J., Belati E. A. y López-Lezama J. M. (2023). A mathematical programming approach for the optimal operation of storage systems, photovoltaic and wind power generation. *Energies*, 16(3), 1269.
- Gusain C., Tripathi M. M. y Nangia U. (2023). Study of meta-heuristic optimization methodologies for design of hybrid renewable energy systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, 39, 101711.
- Jesse B. J., Heinrichs H. U. y Kuckshinrichs W. (2019). Adapting the theory of resilience to energy systems: a review and outlook. *Energy, Sustainability and Society*, 9, 1-19.

- Liu X., Liu Y., Liu J., Xiang Y. y Yuan X. (2019). Optimal planning of AC-DC hybrid transmission and distributed energy resource system: Review and prospects. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 5(3), 409-422.
- Mechleri E. y Arellano-García H. (2018). A mathematical programming approach to optimal design of smart distributed energy systems. In *Computer Aided Chemical Engineering* Vol. 44, pp. 2521-2526.
- Ministerio de Energía (<https://public.tableau.com/app/profile/datosenergia/viz/AdjudicacionesRenovARMINE-MArgentina/AdjudicacionesRenovArArgentina>)(06-04-2024)
- Rabe M., Bilan Y., Widera K. y Vasa, L. (2022). Application of the linear programming method in the construction of a mathematical model of optimization distributed energy. *Energies*, 15(5), 1872.
- Sinsel S. R., Riemke R. L. y Hoffmann V. H. (2020) Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. *Renewable Energy*, 145, 2271-2285.
- Ssekulima E. B., Anwar M. B., Al Hinai A. y El Moursi M. S. (2016). Wind speed and solar irradiance forecasting techniques for enhanced renewable energy integration with the grid: a review. *IET Renewable Power Generation*, 10(7), 885-989.
- Worighi I., Maach A., Hafid A., Hegazy O. y Van Mierlo, J. (2019). Integrating renewable energy in smart grid system: Architecture, virtualization and analysis. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 18, 100226.
- Zhang J., Zhao L., Deng S., Xu W., y Zhang Y. (2017). A critical review of the models used to estimate solar radiation. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 70 pp. 314–329.