

## **Optimización de la integración de energías renovables en sistemas eléctricos, utilizando un algoritmo genético**

Franco Zaneck  
Universidad Nacional  
de Salta  
zaneckfranco@gmail.com  
Salta, Argentina.

### **Resumen**

Este estudio presenta un modelo teórico que introduce un método híbrido para la integración efectiva de energías renovables en sistemas eléctricos, combinando la simulación de valores iniciales con la metaheurística del Algoritmo Genético. Se examinan las estrategias de optimización vigentes, destacando los desafíos y oportunidades asociados con la optimización de sistemas energéticos sostenibles. El objetivo primordial de esta propuesta es definir un modelo que maximice la incorporación de energías renovables y reduzca al mínimo la dependencia de combustibles fósiles en la generación de electricidad, promoviendo así la transición hacia una matriz energética más limpia, diversificada y eficiente. Se abordan las implicaciones de este enfoque para tal transición, enfatizando la necesidad de desarrollar modelos matemáticos capaces de simular y optimizar sistemas energéticos a gran escala, sustituyendo progresivamente las tecnologías basadas en combustibles fósiles por fuentes renovables. Esta estrategia ofrece perspectivas prometedoras para la planificación y operación de sistemas energéticos sostenibles, como se evidencia en los resultados obtenidos de validar el modelo con datos focalizados en la Ciudad de Salta, Argentina.

**Palabras clave:** Optimización energética, Algoritmo Genético, Sistemas de Energías Renovables

## **Optimization of renewable energy integration in electrical systems using a genetic algorithm.**

### **ABSTRACT**

This study presents a theoretical model that introduces a hybrid method for the effective integration of renewable energies into electrical systems, combining initial value simulation with the Genetic Algorithm metaheuristic. Current optimization strategies are examined, highlighting the challenges and opportunities associated with optimizing sustainable energy systems. The primary objective of this proposal is to define a model that maximizes the incorporation of renewable energies and minimizes dependence on fossil fuels in electricity generation, thus promoting the transition to a cleaner, more diversified, and efficient energy matrix. The implications of this approach for such a transition are addressed, emphasizing the need to develop mathematical models capable of simulating and optimizing large-scale energy systems, progressively replacing fossil fuel-based technologies with renewable sources. This strategy offers promising prospects for the planning and operation of sustainable energy systems, as evidenced by the results obtained from validating the model with data focused on the City of Salta, Argentina.

**Keywords:** Energy optimization, Genetic Algorithm, 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 calentamiento global y el objetivo de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para lograr una integración eficiente de las energías renovables en los sistemas eléctricos, es necesario superar varios desafíos técnicos, económicos y regulatorios, así como 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, como la complejidad computacional, la falta de

consideración de las características dinámicas del sistema y la incapacidad de manejar eficientemente múltiples objetivos de optimización.

Por ello, diversos enfoques y estrategias se han propuesto para abordar este desafío y avanzar hacia un sistema energético más sostenible y limpio. Entre estos trabajos, se destacan aquellos basados en la simulación de valores iniciales y la utilización de metaheurísticas. El modelo basado en un enfoque híbrido presentado en este artículo busca ofrecer una solución innovadora mediante la combinación de la simulación de valores iniciales con la metaheurística de Algoritmo Genético, facilitando una integración más eficaz y precisa de las energías renovables en los sistemas eléctricos.

Diversos estudios han señalado la importancia de desarrollar estrategias de optimización efectivas para optimizar el uso de las energías renovables 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 que generen un impacto ambiental reducido.

Actualmente, existen varias estrategias de resolución para el problema planteado, como la programación lineal, la programación matemática y las metaheurísticas. Estas, 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 artículo presenta un modelo que representa un enfoque híbrido que aborda la integración de energías renovables en sistemas eléctricos, basado en la utilización de metaheurísticas y simulaciones. Sin embargo, es crucial señalar que este no es el único enfoque propuesto en la literatura científica. A continuación se resumen brevemente los aportes más significativos realizados por diversos investigadores.

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.

Por otro lado, 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.

Desde el punto de vista computacional, el problema planteado se clasifica como un problema NP-Hard, lo que implica la necesidad de utilizar enfoques como la metaheurística basada en algoritmo genético, para obtener soluciones aproximadas al problema. Los algoritmos genéticos, creados por John Holland, son herramientas de optimización y aprendizaje inspiradas en la evolución biológica de las poblaciones. Al emplear estos algoritmos, es necesario contar con los siguientes elementos:

1. Un método para codificar los cromosomas, que representan las posibles soluciones al problema.
2. Una función de evaluación que asigna una puntuación a cada individuo según su desempeño.
3. Un procedimiento para generar la población inicial.
4. Operadores que simulan procesos biológicos de cruzamiento y la mutación de los individuos.
5. Un criterio de parada del algoritmo.

Dados estos componentes, el algoritmo genético opera de la siguiente manera:

- La población se inicializa, teniendo en cuenta el procedimiento definido en 3. Para ello, cada individuo contiene una solución codificada, teniendo en cuenta lo expresado en 1.
- Cada miembro de la población es evaluado teniendo en cuenta la función definida en 2.
- La población va creciendo y reproduciéndose, hasta que se cumpla lo establecido en 5. Este paso, se divide en:
  - Selección los individuos reproductores. Esta selección se realiza en función de la evaluación de los individuos, ya que la idea consiste en que los mejores individuos propaguen su material genético. Esta selección, se basa

- en los criterios que se hayan definido en 4.
- Aplicando, los operadores de cruzamiento definidos en 4. Se generan los nuevos individuos. Posteriormente, se puede o no aplicar los operadores de mutación.
  - Los descendientes son evaluadas, teniendo en cuenta la función definida en 2 y en caso de ser una mejor solución al problema que alguno de los individuos existentes de la población, se realiza el reemplazo.

## 2. Energías Renovables: Situación en Argentina

En Argentina, el suministro de energía depende en gran medida de los combustibles fósiles. Aunque su bajo costo de producción y facilidad de transporte son ventajas evidentes, no podemos ignorar las consecuencias negativas asociadas. El agotamiento progresivo de estas reservas globales es una preocupación creciente, planteando desafíos significativos para el futuro. Además, el uso de combustibles fósiles es una de las principales causas de contaminación ambiental, lo que puede provocar graves problemas climáticos.

El continuo crecimiento de la población aumenta la demanda de energía eléctrica, lo que a su vez intensifica la presión sobre los recursos energéticos existentes. En este contexto, las energías renovables emergen como una solución prometedora para abordar estos desafíos. Son recursos inagotables y sostenibles que ofrecen una alternativa más limpia y menos dañina para el medio ambiente.

Las energías renovables tienen la capacidad de integrarse rápidamente en el sistema de generación de energía para satisfacer la creciente demanda. Algunas de las fuentes renovables más destacadas en este sentido son:

- Las térmicas que utilizan biomasa como combustible (turbo vapor o motores)
- Las centrales eólicas
- Las solares fotovoltaicas y solares de concentración
- Pequeños aprovechamientos hidroeléctricos

### 2.1 Energía Eólica

La energía eólica es la tecnología que ha mostrado mayor participación desde la activación del mercado de las energías renovables en Argentina. Esto puede observarse en las adjudicaciones hechas por Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima (CAMMESA) en los mecanismos de compras conjuntas (CC), el

Programa RenovAr y la Resolución 202/2016, así como en las asignaciones de prioridad de despacho otorgadas en el marco del Mercado a Término de Energías Renovables (MATER) a partir de febrero de 2018 (Ministerio de Energía y Minería)

## **2.2 Energía Solar**

En los últimos años, el desarrollo de las tecnologías que posibilitan el aprovechamiento de la radiación solar ha mejorado en eficiencia y en precio, tanto en la conversión directa en electricidad (solar fotovoltaica) como en el aprovechamiento térmico, de alta, media, y baja temperatura, sea para generar electricidad o para uso del calor. Estas mejoras posibilitan que sean opciones de diversificación de la matriz en lo inmediato. El costo del kWh utilizado para calentar agua destinada a usos residenciales y comerciales es el más competitivo de todos, posibilitando importantes aportes a la industria local y generando numerosos puestos de trabajo.

La creación de un marco regulatorio adecuado y un código de edificación urbano que impone una cuota obligada de utilización de esa tecnología ha tenido éxito en múltiples países desarrollados y emergentes.

En el caso de solar fotovoltaica, los nichos en función de su uso final se clasifican en términos de conectados y aislados de la red, según corresponda. En el primer grupo se incluyen tanto los sistemas distribuidos en techos y fachadas como los parques de grandes dimensiones, los periurbanos en punta de línea o conectados en puntos estratégicos.

En el segundo grupo, se encuentran todos aquellos sistemas que generan energía en forma autónoma, sea para aplicaciones domiciliarias, industriales o sociales. Esta tecnología es una de las más útiles para abastecer el medio rural disperso, que estructuralmente está fuera de la cobertura de red y posibilitar así la inclusión y el acceso a una senda de desarrollo digna y sostenible a una población muy vulnerable de casi dos millones de argentinos. El programa PERMER II, que incluye usos productivos de esta tecnología, es un paso en la dirección correcta, aunque resulte insuficiente todavía en términos de escala geográfica.

Para la instalación de centrales con potencias significativas, Argentina cuenta con un gran número de sitios muy atractivos por tener bajo costo de tierra, alta radiación solar y buenos puntos de conexión a la red disponible (las regiones de Noroeste y Cuyo principalmente).

Si bien Argentina cuenta con potenciales energéticos muy favorables, los primeros contratos celebrados hace 5 años estaban alrededor de los 560 USD/MWh, mientras que hoy rondan los 240 USD. Este precio podría reducirse sustancialmente si el marco regulatorio y las líneas de crédito fueran los adecuados. Con tasas y períodos de repago

competitivos conforme a valores internacionales del sector, como por ejemplo los casos de Brasil, Chile y Uruguay, las tarifas locales serían sensiblemente más bajas y muy competitivas respecto de otras tecnologías que forman parte de la matriz actual.

### **2.3 Bioenergías**

El sector de la bioenergía en Argentina sigue mostrando resultados positivos. Esto se evidencia tanto en relación al creciente número de proyectos ejecutados y en proceso de ejecución, como en la maduración del sector, ya que las sinergias van sentando una base de conocimiento y experiencia. Que han podido consolidar estructuras tecnológicas de calidad internacional, con ingenierías y equipos a la altura de los mejores y más exigentes mercados del mundo.

Los proyectos de biogás y de biomasa seca (aquella que se obtiene naturalmente con un tenor de humedad menor al 60%, como la leña, el residuo agrícola de cosecha y otros) mostraron un gran crecimiento entre la Ronda 1 y la Ronda 2 del Programa RenovAr, lo que evidencia una fuerte demanda del sector de invertir en este tipo de tecnologías: de 6 proyectos de biogás y 2 de biomasa adjudicados en la Ronda 1, se pasó a 32 y 16, respectivamente, en la Ronda 2.

De las ofertas adjudicadas, ya son 6 las que se encuentran en operación comercial: 4 son proyectos de biogás: Río Cuarto I, de 2,00 MW, y Río Cuarto II, de 1,20 MW, ambas en la provincia de Córdoba; Yanquetruz, de 1,20 MW, en la provincia de San Luis; y San Pedro Verde, de 1,42 MW, en la provincia Santa Fe. En tanto, los proyectos operativos de biomasa son Pindó Eco-Energía, de 2,00 MW, en Misiones; y Prodemán, de 9 MW, en Córdoba.

### **2.4 Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos**

La ley 26190 de 2006, consideró como renovables a la generación hidroeléctrica menor a 30 MW. De este modo, muchas centrales que ya estaban operativas en diferentes provincias pasaron a sumar parte de la generación renovable del país (Ministerio de Energía y Minería).

El programa GENREN incluyó en su licitación nueva potencia hidroeléctrica de este tipo y fueron adjudicados 5 proyectos (todos menores a 5 MW). De estos proyectos, sólo se pusieron en marcha 2 en la provincia de Mendoza. En ambos casos fueron viejas usinas abandonadas ubicadas en el sistema de canales de riego cercano a la ciudad de Mendoza. Los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos que se concretaron fueron La Lujanita (1,7 MW/h) y Luján de Cuyo (1 MW/h) (Ministerio de Energía y Minería).

En el caso de La Lujanita, se aprovechó la obra civil que estaba



prácticamente intacta y se incorporó un nuevo sistema de generación. Este proyecto fue impulsado por la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo y se utiliza también para prácticas de laboratorio (Ministerio de Energía y Minería).

### 3. Metodología de Trabajo

El enfoque híbrido propuesto en este artículo combina la simulación de valores iniciales con la metaheurística basada en Algoritmo Genético, 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 las energías renovables.

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 trabajo abordado en este artículo, puede dividirse en las siguientes etapas:

#### 3.1 Planteamiento del Problema: Definición de la 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 utilizada; 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 (1),  $X$  corresponde a la demanda eléctrica a satisfacer. Las variables  $C_i$  corresponden al costo de generación y traslado para la energía renovable  $i$ -ésima. Por otro lado, las variables  $R_i$  corresponden 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.

### 3.2 Planteamiento del Problema: Definición de las Restricciones

Después de establecer la función objetivo y las variables relacionadas en el proceso, se vuelve imprescindible identificar las restricciones matemáticas que afectan a estas variables dentro del contexto del problema bajo estudio. Estas restricciones contemplan:

1. La cantidad de energía eléctrica generada por cada fuente no supere la demanda eléctrica a suplir. Esto se resume en la ecuación (2).

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

2. La reducción del impacto en el medio ambiente de la generación de energía eléctrica. Lo que se pretende es que el impacto ambiental de la generación por fuentes convencionales sea el mínimo 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  $\epsilon_{CO_2}$ , delta tolerable de emisión.

3. La no negatividad de las variables como así también considerar los máximos posibles de generación para cada fuente energética. 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:

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

### 3.3 Obtención de 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 algoritmo y de esta manera poder dar una solución al problema planteado.

Dado que el estudio se enfoca en la Ciudad de Salta, resulta crucial resaltar que los únicos recursos energéticos a tener en cuenta son aquellos provenientes de las fuentes explotadas en la región del Noroeste Argentino (NOA). Considerar fuentes de energía de otras regiones del país resultaría en costos adicionales que podrían hacer inviable cualquier solución propuesta por el algoritmo.

Estos potenciales energéticos se pueden observar en la figura 1. Los mismos fueron extraídos de la página de CAMMESA. A partir de estos datos, las fuentes de energía a utilizar se resumen en la tabla 1. Los costos de generación y traslado para cada tecnología se tomaron a partir los precios adjudicados en los diferentes proyectos desarrollados por el Ministerio de Energía y Minería del año 2021 (Ministerio Energía, 2021).

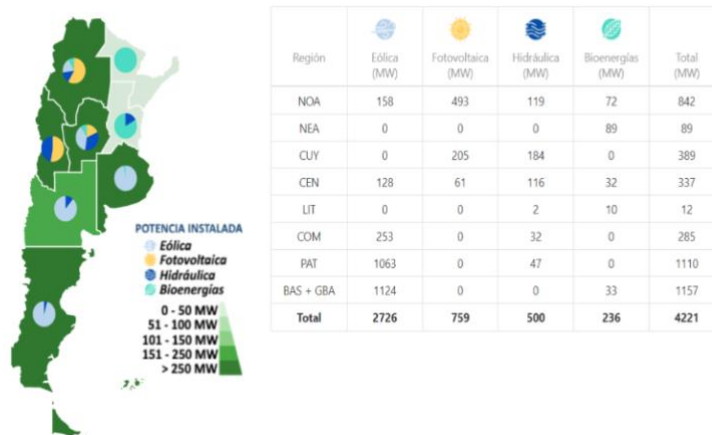


Figura 1: Potencial Instalado por cada región y cada tecnología

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

| 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            | 1854.7               |
|                         |                                  | 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         | 1849.13              |
|                         |                                  | Energías Sustentables S.A. (Nonogasta IV)      | 1             | 200.2                |
|                         | Jujuy                            | Jemse (Cauchari 1,2,3)                         | 300           | 26065.7              |
|                         | Salta                            | Isolux Ingeniería S.A. (Cafayate)              | 80            | 7035.7               |
|                         |                                  | Neoen S.A. (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               |

### 3.4 Simulación de valores iniciales

Para poder iniciar el algoritmo o bien sustituir algún gen durante el proceso de mutación, es necesario simular utilizando diferentes ecuaciones matemáticas los valores para las distintas fuentes de energía renovable. Es por eso que en el siguiente apartado se describen los mecanismos que permiten este procedimiento. En este caso, se consideran únicamente las fuentes de energía de fácil acceso y cuya explotación sea factible dentro del territorio de la Ciudad de Salta y la provincia del mismo nombre.

**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  $A_{WG}$  la densidad del aire es igual a  $\rho$ .  $V_c$  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). La variable  $P_{WG,r}$  representa 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,  $\eta_{PV}$  es la eficiencia de los módulos fotovoltaicos y  $A_{PV}$  representa el área del panel fotovoltaico (m<sup>2</sup>). En este trabajo, se supone que el  $\eta_{PV}$  es constante y es igual al 7%.

**Biomasa:** La energía solar transformada por las plantas, se transfiere posteriormente a los animales a través de cadenas tróficas. El reino animal aprovecha, transforma y utiliza la energía química almacenada en las plantas. Durante este proceso, se generan subproductos que no son aprovechados en la cadena alimentaria ni son útiles para la fabricación de productos comerciales. Sin embargo, estos subproductos pueden ser empleados como combustible en diversos usos 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.

### 3.5 Solución al problema

El proceso inicia con la creación de una población inicial que consta de  $m$  individuos, donde cada individuo posee  $n$  genes. Cada gen representa el potencial de energía obtenible de cada una de las fuentes mencionadas anteriormente. Por ende, un individuo consistirá en 18 genes, correspondiendo cada uno de ellos a una de las fuentes mencionadas en la tabla 1.

En la figura 2 se muestra un ejemplo de un individuo genérico, para este caso podemos observar que dada una demanda  $X$  (MWh) una posible solución al problema consiste en suplir dicha demanda en 15% de la energía utilizando energías renovables (de ese porcentaje podemos desglosar que las fuentes 1, 3, 7, 11 y 14 aportaría con un 2% de su potencial energético a la solución final, mientras que la fuentes 2, 4, 8, 12 y 15 aportaría a la solución final con un 1% de su potencial energético) y el 85% restante se supliría utilizando fuentes convencionales.

|                              |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
|------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Cantidad de Energía Generada | 2% | 1% | 2% | 1% | 0% | 0% | 2% | 1% | 0% | 0% | 2% | 1% | 0% | 2% | 1% | 0% | 0% | 85% |
|------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|

Figura 2: Ejemplificación de un individuo

Una vez creada y validada la población inicial, considerando las restricciones del modelo, se asigna a cada individuo el valor correspondiente de la función objetivo. Luego, se seleccionan los mejores  $p$  individuos para ser utilizados como reproductores, mediante la técnica de selección por torneo, donde se comparan al azar 2 individuos y se elige el mejor según su valor de función objetivo.

Los reproductores seleccionados participan en el proceso de reproducción mediante la técnica de cruce uniforme. Se genera una máscara de cruce con valores binarios: si la posición de la máscara es 1, el gen correspondiente se copia del primer reproductor; si es 0, se copia del segundo. Se obtienen así dos descendientes intercambiando la interpretación de los unos y los ceros de la máscara de cruce.

Posteriormente, se lleva a cabo el proceso de mutación para cada descendiente, con una probabilidad  $t$ . Si se requiere mutación, se elige aleatoriamente un gen y se genera un nuevo valor según las fórmulas definidas en el apartado anterior.

Una vez obtenidos los descendientes, se verifica su validez teniendo en cuenta las restricciones del problema. Luego, se reemplazan los individuos de la población anterior con los nuevos si estos últimos tienen mejor valor para la función objetivo, mejorando de esta manera la solución existente.

Este proceso se repite un número determinado de veces. Al finalizar las repeticiones, el algoritmo concluye su ejecución y se devuelve el mejor individuo de la población como solución óptima. En la tabla 2, se presentan

los parámetros utilizados en el algoritmo.

Tabla 2: Parámetros utilizados en el algoritmo

| Parámetro                 | Valor Definido   |
|---------------------------|------------------|
| Tamaño de la población    | 40               |
| Cantidad de reproductores | 16               |
| Probabilidad de mutación  | 0.05             |
| Número de ejecuciones     | 200 repeticiones |
| Número de ejecuciones     | 200 repeticiones |

#### 4. Validación del Modelo: Resultados Obtenidos

A partir del modelo desarrollado en las secciones anteriores, el siguiente paso consiste en realizar una validación estadística del mismo. Este procedimiento se basó en comparar los resultados arrojados por el algoritmo desarrollado en el presente trabajo y diferentes softwares propuestos en la literatura, como ser HybSim y Homero.

Para validar el modelo de optimización propuesto para la gestión de energías renovables destinadas a satisfacer la demanda eléctrica de la Ciudad de Salta, se consideraron los datos presentados en la Tabla 1 y se establece un límite aceptable de emisiones de CO<sub>2</sub> de 1850 kg/año. Los datos mensuales del consumo eléctrico requerido, utilizados como entrada, fueron obtenidos mediante herramientas y técnicas desarrolladas por el autor, que se basan en métodos de aprendizaje automático y redes neuronales. Estos valores se resumen en la Tabla 3, que presenta las demandas eléctricas durante los meses de mayor consumo para la Ciudad de Salta.

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 Figuras 3 a 6, proporcionan una comparación detallada de los resultados obtenidos entre el algoritmo propuesto y los softwares de referencia. Cada fila de estas tablas ofrece información crucial sobre cómo asignar 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, 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 muestran las siglas correspondientes a los resultados obtenidos por el algoritmo genético propuesto (AG), los resultados proporcionados por el software Homero (HO) y los resultados 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.

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 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| AG | 2% | 1% | 0% | 3% | 4% | 2% | 0% | 7% | 2% | 0%  | 8%  | 4%  | 7%  | 3%  | 1%  | 6%  | 1%  | 49% |
| HO | 1% | 0% | 1% | 4% | 6% | 3% | 0% | 7% | 3% | 0%  | 10% | 3%  | 5%  | 5%  | 1%  | 4%  | 0%  | 47% |
| HY | 1% | 2% | 1% | 2% | 3% | 2% | 0% | 7% | 2% | 0%  | 10% | 5%  | 6%  | 6%  | 1%  | 4%  | 1%  | 47% |

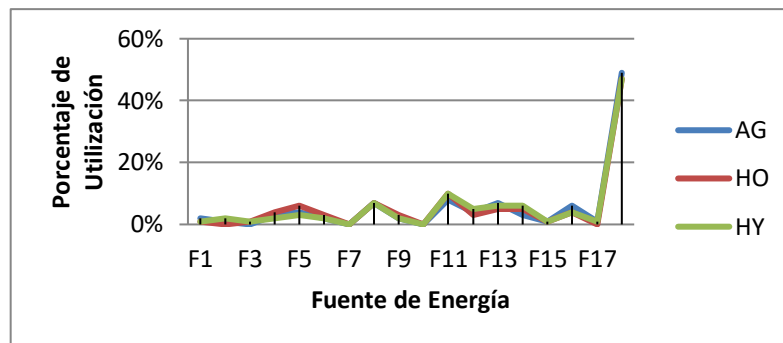


Figura 3: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Enero

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 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| AG | 2% | 1% | 0% | 3% | 4% | 2% | 0% | 7% | 2% | 0%  | 8%  | 4%  | 7%  | 3%  | 1%  | 6%  | 1%  | 49% |
| HO | 1% | 0% | 1% | 4% | 6% | 3% | 0% | 7% | 3% | 0%  | 10% | 3%  | 5%  | 5%  | 1%  | 4%  | 0%  | 47% |
| HY | 1% | 2% | 1% | 2% | 3% | 2% | 0% | 7% | 2% | 0%  | 10% | 5%  | 6%  | 6%  | 1%  | 4%  | 1%  | 47% |



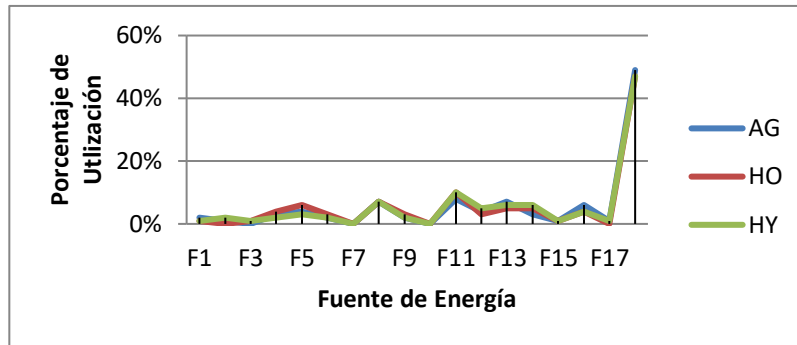


Figura 4: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Abril

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 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| AG | 3% | 2% | 1% | 2% | 3% | 0% | 2% | 6% | 3% | 2%  | 7%  | 3%  | 8%  | 3%  | 2%  | 4%  | 0%  | 49% |
| HO | 2% | 1% | 0% | 1% | 4% | 1% | 2% | 5% | 2% | 2%  | 6%  | 4%  | 9%  | 4%  | 3%  | 5%  | 1%  | 48% |
| HY | 2% | 1% | 0% | 3% | 4% | 1% | 1% | 5% | 2% | 2%  | 5%  | 4%  | 10% | 4%  | 3%  | 4%  | 1%  | 48% |

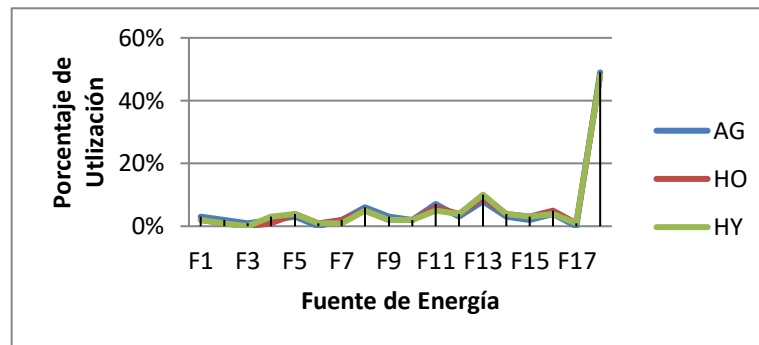


Figura 5: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Julio

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 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| AG | 1% | 3% | 2% | 1% | 2% | 2% | 4% | 3% | 4% | 2%  | 8%  | 3%  | 9%  | 2%  | 1%  | 3%  | 2%  | 48% |
| HO | 3% | 3% | 3% | 2% | 2% | 1% | 3% | 2% | 3% | 0%  | 9%  | 3%  | 9%  | 2%  | 2%  | 3%  | 2%  | 48% |
| HY | 3% | 2% | 2% | 0% | 2% | 2% | 1% | 3% | 4% | 1%  | 10% | 3%  | 8%  | 3%  | 2%  | 4%  | 2%  | 48% |

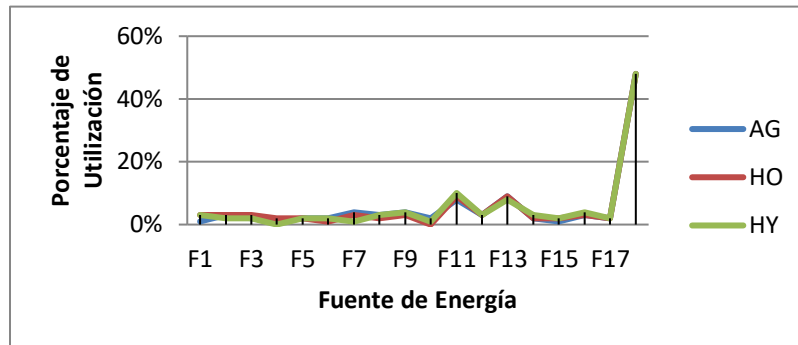


Figura 6: Comparación de resultados entre el algoritmo propuesto y los algoritmos de la literatura para el mes de Noviembre

Desde una perspectiva estadística, se calculó el 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 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. 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 en cada uno de los algoritmos propuestos 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.

## 5. 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 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 Algoritmo Genético, 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 para avanzar hacia un futuro energético más sostenible y resiliente.

## 6. 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://despachorenovables.cammesa.com/potencia-instalada/>)
- 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-Garcia 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 y Minería. (2021) (<https://www.minem.gob.ar/www/833/25871/precios-adjudicados-del-programa-renovar>)
- 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.