



DIMENSIONAMIENTO Y GESTIÓN ÓPTIMOS DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE AUTOCONSUMO PARA EL SISTEMA DE BOMBEO EN LA ESTACIÓN ELEVADORA DE LUCENA (CÓRDOBA)

**Manuel Lopera Rodríguez^{1,2}, Martín Calero Lara¹, Irene Rosa Fernández
García¹, Pilar Montesinos Barrios¹, Jorge García Morillo¹**

¹ Universidad de Córdoba, España

² *manuellr0398@gmail.com*

RESUMEN

Este trabajo desarrolla, en primer lugar, una estrategia de control optimizado para reducir el coste de energía consumida por el sistema de bombeo de la estación elevadora de Lucena, Córdoba; en segundo lugar, una estrategia de dimensionamiento para una instalación fotovoltaica de apoyo para el sistema de bombeo.

Ambas estrategias se implementan mediante algoritmos genéticos, un método heurístico para resolver problemas multimodales buscando la solución “cuasi” óptima a partir de un conjunto inicial de posibles soluciones que va evolucionando con cada iteración.

El algoritmo de optimización del bombeo concluye que, modificando la distribución horaria del bombeo, se reduciría hasta en un 12 % el coste de la energía consumida.

El algoritmo para el dimensionamiento de instalación fotovoltaica, considerando el bombeo optimizado, permite determinar la potencia a instalar, realizando un estudio comparativo del ahorro, en términos relativos y absolutos, obtenido para distintos valores de potencia fotovoltaica instalada. A partir de estos resultados, se realizó un proyecto de instalación fotovoltaica de 99,9 kWp, amortizable en 13 años, con una vida útil de 25 años, durante los que se generarían 161,8 MWh/año, con una reducción total asociada de 1.393,1 toneladas de CO₂, y un beneficio tras amortización de 159.783,18 €.

Palabras clave

Optimización, Bombeo, Fotovoltaica

1. INTRODUCCIÓN

En España, aproximadamente el 20% del agua consumida se destina al uso urbano. En este sentido, la gestión del ciclo integral del agua contempla principalmente las gestiones de captación, potabilización, distribución, alcantarillado y drenaje urbano y depuración.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

En lo referente a la gestión de la distribución del agua en la provincia de Córdoba, la Empresa Provincial de Aguas de Córdoba (EMPROACSA) dispone de un abastecimiento en alta mediante 35 estaciones elevadoras con una potencia total de 11,195 MW.

Dado el elevado y continuo consumo de energía eléctrica de estas estaciones elevadoras, y su consecuente impacto en el coste económico debido al incremento de las tarifas eléctricas, cada vez se implantan más soluciones que contribuyan a reducir dicho coste.

Una solución adecuada para el ahorro en la factura eléctrica son las instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo, que suministran energía para el bombeo, reduciendo o suprimiendo la dependencia de la red eléctrica, además de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera. En este trabajo se aborda el diseño de instalaciones de bombeo con un enfoque sostenible basado en estrategias de control que optimicen el diseño [1] y/o la gestión de sus sistemas [2][3] combinadas con el uso de la energía fotovoltaica [4].

2. OBJETIVOS

Este trabajo contempla el desarrollo de dos estrategias encaminadas a reducir el coste del consumo energético de la estación de bombeo de una red de distribución de agua, a saber:

- Optimización del control del bombeo mediante la actuación sobre la secuencia de activación/desactivación de las bombas que lo componen.
- Dimensionamiento óptimo de la potencia fotovoltaica a instalar para el apoyo a la demanda energética del sistema partiendo del control optimizado del sistema de bombeo.

Las estrategias desarrolladas se evaluarán en el sistema de bombeo de la estación elevadora de Lucena (Córdoba).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CASO DE ESTUDIO

La Estación Elevadora (en adelante, EE) de Lucena abastece de agua a este municipio mediante una instalación que consta de dos elementos fundamentales:

- Sistema de bombeo: la EE dispone de cuatro bombas de impulsión con caudal y potencia nominales de $455 \text{ m}^3/\text{h}$ y 217 kW, respectivamente. Si bien el total de las bombas están dispuestas en paralelo contemplando la posibilidad de que varias funcionen conjuntamente, el régimen de funcionamiento actual recurre a una única bomba, que puede alternarse con otras dos, manteniendo la cuarta como reserva.
- Depósito de almacenamiento: a la salida del sistema de bombeo, la EE cuenta con un depósito de un máximo de almacenamiento de 6.000 m^3 , desde el cual se realiza la evacuación de agua al municipio según la demanda.

El coste de la energía consumida por esta instalación viene determinado por la tarifa eléctrica contratada, a saber, la 3.1A, que establece un coste horario de la energía consumida en función de la hora del día y la estación, según se detalla en la Tabla 1. Se establecen así tres periodos tarifarios P1, P2 y P3, en orden decreciente de coste energético.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Tabla 1. Distribución horaria y precio de la energía según el periodo tarifario para la estación evaluada

Periodos Tarifa 3.1 A	Invierno	Verano
P1 (0.094532 €/kWh)	De 10 a 16 horas	De 17 a 23 horas
P2 (0.087819 €/kWh)	De 8 a 10 y de 16 a 24 horas	De 8 a 17 y de 23 a 24 horas
P3 (0.069247 €/kWh)	De 0 a 8 horas	De 0 a 8 horas

3.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las estrategias desarrolladas en este trabajo se centran en minimizar el coste energético de la estación de bombeo de las redes de distribución de agua:

$$C = E \cdot \sum_{i=0}^n Ind[i] \cdot C_h[i] \quad (1)$$

Para ello, será necesario elaborar un modelo que represente fielmente la estación, basado en información recogida en auditorías energéticas (datos de funcionamiento: consumo, volumen del depósito de agua, volumen bombeado, número de bombas y potencia y caudal respectivos; y económicos: coste de la energía).

El depósito de agua de la EE actúa como factor limitante de la demanda de agua que es posible cubrir sin recurrir al bombeo, con volúmenes horarios variables entre 0 y un valor máximo.

El nivel del depósito se modela en función del volumen de agua en cada hora, condicionado por el volumen inicial (variable de entrada del modelo), el consumo de agua (reducción de nivel del depósito) y el bombeo (aumento de nivel del depósito). A partir de la curva de demanda media de la EE, y los datos de consumo diario a lo largo de un año, se calcula el consumo estimado para cada hora del día a lo largo del año.

Para modelar el bombeo, se establece un array binario en el que cada valor representa el estado de la bomba para una hora del año, identificando que se está bombeando o no mediante los valores “1” y “0”, respectivamente, para cada una de las horas del año.

Para calcular el coste de la energía consumida a lo largo del año, una vez modelado el bombeo de agua, se obtiene el coste horario en función de la tarifa aplicables.

3.3 ALGORITMO GENÉTICO COMO HERRAMIENTA DE RESOLUCIÓN DEL MODELO

El problema planteado dispone de un número elevado de soluciones que deberían ser evaluadas. Para el caso concreto de una única bomba funcionando a lo largo del año, la solución constará de un conjunto de unos (encendido) y ceros (apagado), siendo el número de elementos de cada solución el número de horas que componen el año.

Se trata de un problema multimodal con diversas restricciones, para los que es común recurrir a métodos heurísticos para su resolución: herramientas eficientes que buscan soluciones válidas, no necesariamente la óptima, estableciendo la importancia no sólo de encontrar soluciones de calidad, sino también la garantía de encontrarlas rápidamente, dada las elevadas opciones disponibles.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

En línea con lo establecido, uno de los métodos heurísticos de resolución de problemas multimodales son los algoritmos genéticos, una técnica de optimización metaheurística, que se fundamenta en la búsqueda de la solución “cuasi” óptima, a partir de un conjunto inicial de posibles soluciones, denominado población inicial, el cual va evolucionando en cada iteración del algoritmo simulando la teoría de la evolución que ocurre en la naturaleza [5].

El proceso secuencial de un algoritmo genético (en adelante GA, por las siglas de *Genetic Algorithm*) se puede resumir como la consecución de los siguientes pasos, con sus respectivos conceptos asociados:

- Creación de la población inicial: se crea un conjunto inicial de N individuos de manera aleatoria. Los individuos representan una de las posibles soluciones al problema de optimización. El tamaño de la población permanecerá invariable a lo largo de todas las generaciones, que representan cada iteración del algoritmo. Si la ejecución es correcta, la última generación incluye los mejores individuos, es decir, soluciones al problema planteado. En este caso, se ha realizado una segmentación del problema para una implementación más eficiente de restricciones al mismo. Así, el intervalo temporal completo del problema se subdividirá en cada uno de los 366 días del año 2020, ejecutándose el GA de manera independiente para todos ellos. Los parámetros de partida del problema serán el volumen inicial del depósito, partiendo de la situación desfavorable de 1000 m^3 de los 6000 m^3 posibles, y el máximo número de bombas funcionando simultáneamente, que no superará la unidad. Se establece una población de 500 individuos.

Los individuos de la población inicial serán *arrays* de 24 valores (uno por hora del día) de tipo binario (valor 0 para bomba apagada y 1 para encendida). Imponiendo un volumen de referencia al terminar el día de 1600 m^3 en el depósito, y aproximado el consumo horario, se calculan el número de horas de bombeo activo a distribuir aleatoriamente en el individuo.

- Evaluación de los individuos de la población. Cada individuo se evalúa mediante la determinación de la función objetivo, y en función del resultado de su evaluación, se determina su aptitud. La función de evaluación no solo incorpora la propia evaluación del individuo, sino que puede incluir penalizaciones, mecanismos de corrección que permiten guiar el algoritmo hacia soluciones con características específicas. Estas penalizaciones limitan el éxito de soluciones que son óptimas en cuanto al valor a optimizar, pero incompatibles con las restricciones del problema. En este caso, la variable que se desea optimizar es el coste del bombeo mediante la distribución horaria del mismo. La función objetivo diseñada para el GA será:

$$C = E \cdot \sum_{i=0}^{23} (Ind[i] \cdot C_h[i]) + Pen_{max} \cdot 200 + Pen_{dep} \cdot 100 \quad (2)$$

La función objetivo considera el propio coste de la energía a partir del coste horario de la misma para cada hora bombeando, y penalizaciones de 200 € por hora en la que el volumen del depósito pertenece al intervalo de 0 a 6000 m^3 , y de 100 € en caso de que dicho volumen quede en un intervalo de “riesgo” entre los 0 y 1000 m^3 .

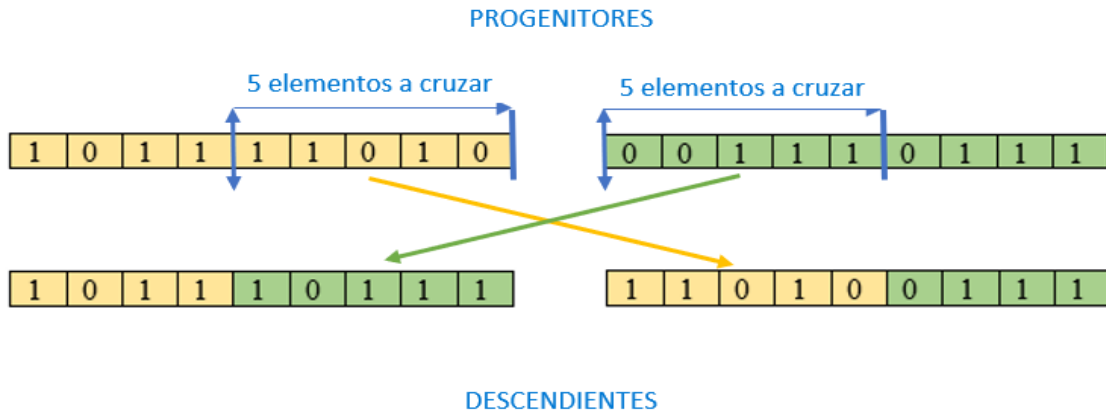
- Aplicación de operaciones genéticas para determinar los nuevos individuos de la siguiente generación. Estas operaciones genéticas conllevan la selección aleatoria de

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

individuos, y su posterior mutación (alteración aleatoria de características del individuo) y/o cruzamiento (intercambio aleatorio de características entre individuos distintos). En este sentido, cabe destacar que un GA que priorice el cruzamiento permite profundizar en soluciones derivadas de la primera generación, mientras que al priorizar la mutación ofrece una mayor variedad de patrones de soluciones, sin llegar a profundizar en sus combinaciones. El reparto probabilístico de ambos tipos de operaciones se ha establecido del 50% para cada uno, y las operaciones genéticas para la creación de las sucesivas generaciones (se establece en 40) son:

- Cruzamiento mediante función *cxPuntoÚnico*, creada para este problema. Partiendo de dos individuos progenitores, se crean dos nuevos individuos, su descendencia, mediante el cruzamiento de las variables que los definen, el número de valores a intercambiar, y la posición aleatoria a partir de la cual se producen los intercambios, sin que se altere el total de horas de bombeo.



*Figura 1. Operación genética de cruzamiento de individuos *cxPuntoÚnico**

Mutación mediante funciones *MutTransfiereBomba* y *MutRecuperaBomba*, que intercambia la posición de una hora de bombeo activo por otra sin bombeo, o viceversa, respectivamente.

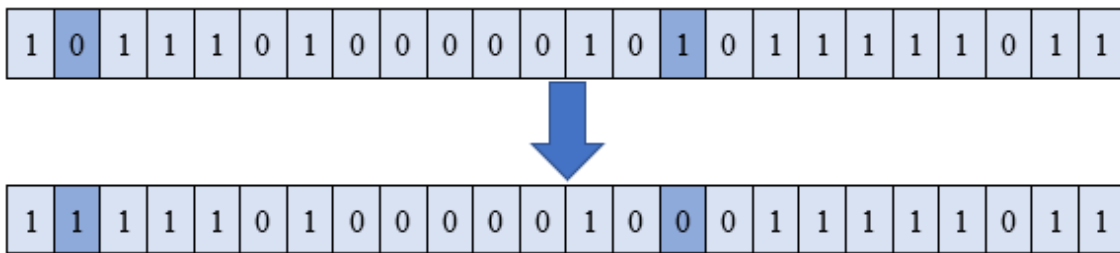


Figura 2. Operación genética de mutación de individuo

- Creación de la siguiente generación a partir de los individuos obtenidos mediante las operaciones genéticas y los seleccionados por mejores resultados de la función de evaluación.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Repetición de los pasos 2, 3 y 4 hasta evaluar la generación final u obtener una solución suficientemente “cuasi óptima” del problema. El resultado del GA serán los individuos que resulten del proceso de selección en la última generación.

Una vez ejecutado el GA para el conjunto de horas del año, se tendrá la distribución horaria del control del bombeo optimizado para minimizar el coste de la energía consumida.

3.4 ALGORITMO GENÉTICO DE DIMENSIONAMIENTO FOTOVOLTAICO CON CONTROL DEL BOMBEO OPTIMIZADO

La segunda estrategia planteada contempla el dimensionamiento de una instalación fotovoltaica como apoyo al suministro eléctrico procedente de la red, teniendo en cuenta el control óptimo de la secuencia de activación/ desactivación de las bombas. Para ello, se evaluarán distintas potencias pico instaladas (en este caso desde 5 kWp hasta 225 kWp, ambos inclusive, con incrementos de 20 kWp). Así, se determinará el rendimiento de cada solución conociendo qué ahorro ofrecido es mayor combinando el apoyo de la generación fotovoltaica con el control optimizado. En este caso, la ecuación 2 se ve modificada para considerar la energía procedente del sistema fotovoltaico $P_{PV}[i]$:

$$C = \sum_{i=0}^{23} (E - P_{PV}[i])(Ind[i] \cdot C_h) + Pen_{max} \cdot 200 + Pen_{dep} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde:

$$P_{PV}[i] = \begin{cases} (1 - \eta) P_p \cdot \frac{G_{total}[i]}{G_{referencia}} & , T[i] \leq T_{ref} \\ (1 - \eta) P_p \cdot \frac{G_{total}[i]}{G_{referencia}} \cdot \left[1 - \alpha \cdot (20 - T_{ref}) \cdot \frac{G_{total}[i]}{800} \right] & , T[i] > T_{ref} \end{cases} \quad (4)$$

Conocida la energía inyectada en el sistema para cada hora del año según valores ambientales, de rendimiento y de características técnicas de los dispositivos escogidos, la función objetivo se actualiza considerando el apoyo de la generación fotovoltaica. Dicha función objetivo no solo considera la energía inyectada que es dedicada a bombeo, sino también la compensación económica por los excedentes vertidos a la red en las horas en los que no se dedica energía al bombeo.

4. RESULTADOS

Las dos estrategias propuestas se analizaron en el sistema de bombeo de la estación elevadora de Lucena, cuyo depósito tiene un volumen máximo de 6000 m³, considerando 500 individuos y 40 generaciones durante el proceso de optimización. Los resultados del algoritmo de optimización del bombeo concluyeron que, solo modificando la distribución horaria del bombeo, el sistema podía reducir hasta en un 12 % el coste económico del término de energía en la instalación. Este efecto se produce como resultado de concentrar las horas de bombeo activo en el periodo tarifario P3, de menor coste asociado, y minimizar el bombeo en el periodo P1, de mayor coste, como se muestra en la Tabla 2.

Respecto al modelo combinado de optimización del control del bombeo y dimensionamiento de la instalación fotovoltaica, se observó que el ahorro estimado crece en términos absolutos a mayores valores de potencia fotovoltaica instalada, pero es el rango entre los 65 y los 145 kWp en el que el ahorro se incrementa aún más en términos relativos, desde los 169 €/kWp anuales para 65 kWp, hasta los 185 €/kWp para 145 kWp, estabilizándose este valor relativo

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

a partir de dicha potencia instalada. Estos valores impactan de forma directa en la rentabilidad de la inversión requerida para instalar el generador.

Tabla 2. Distribución del bombeo en periodos tarifarios antes y después de la optimización

Periodos Tarifa 3.1 A	Distribución del consumo con control actual [%]	Distribución del consumo con control optimizado [%]
P1 (0.094532 €/kWh)	17,48 %	3,41 %
P2 (0.087819 €/kWh)	66,58 %	29,04 %
P3 (0.069247 €/kWh)	15,96 %	67,54 %

También en la Figura 4 se aprecia que, planteando el caso de compensación o no por excedentes vertidos a la red, la diferencia del ahorro en términos relativos entre ambas posibilidades se reduce conforme aumenta la potencia fotovoltaica instalada que se considera.

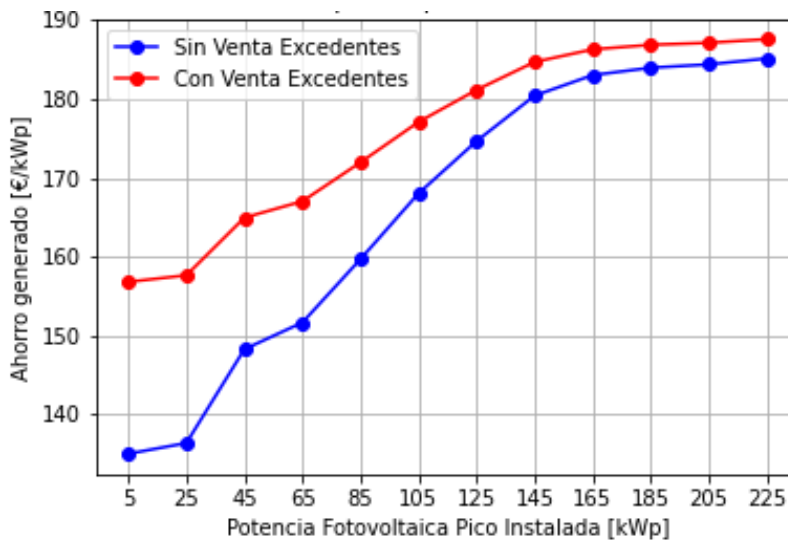


Figura 1. Análisis del ahorro anual por kWp instalado

Resulta de especial relevancia comprobar que, hasta alcanzar aproximadamente los 100 kWp, el impacto de la energía inyectada sobre el coste del bombeo no es suficiente para que el algoritmo priorice en más de un 85% el bombeo en horas de mayor generación fotovoltaica. Esto se observa en la Figura 5, donde se aprecia que para potencias menores de 45 kWp, más de un 25 % de la energía inyectada por el generador se decide verter a la red en lugar de emplearse para activar el bombeo con apoyo del generador, y es el motivo por el que en la Figura 4 las diferencias de ahorro con y sin compensación por excedentes es mayor para potencias instaladas menores.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

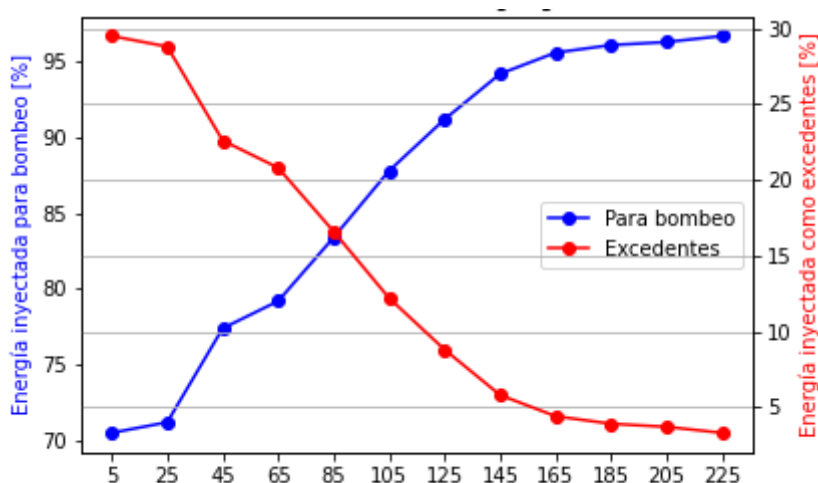


Figura 2. Análisis del uso de la energía inyectada por el generador fotovoltaico según potencia pico instalada

A partir de los resultados del análisis del uso de energía fotovoltaica versus potencia instalada se ha diseñado una instalación fotovoltaica para el sistema de bombeo estudiado tras la optimización de su gestión. La instalación que resulta es de 99.9 kWp, que se amortizaría en 13 años, con una vida útil de 25 años durante los que se generarían 167.8 MWh/año, reduciendo la emisión de CO₂ en 1393.1 tn.

5. CONCLUSIONES

Los resultados avalan el uso de los algoritmos desarrollados, tanto como método de optimización de la gestión del bombeo en estaciones elevadoras, como de dimensionamiento óptimo de instalaciones fotovoltaicas de apoyo a dichas estaciones.

La aplicación de la metodología propuesta al caso de estudio permitiría un funcionamiento más sostenible que el actual con una reducción de 1391.1 tn de CO₂ en 25 años de vida útil, proporcionando, con las tarifas consideradas, un beneficio de 159.783,18 €, considerando también la compensación por excedentes.

REFERENCIAS

- [1] Fernández García, I., Creaco, E., Rodríguez Díaz, J. A., Montesinos, P., Camacho Poyato, E., & Savic, D. (2016). *Rehabilitating pressurized irrigation networks for an increased energy efficiency*. *Agricultural Water Management*, 164, 212–222. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2015.10.032>
- [2] Fernández García, I., Montesinos, P., Camacho Poyato, E., & Rodríguez Díaz, J. A. (2016). Energy cost optimization in pressurized irrigation networks. *Irrigation Science*, 34(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00271-015-0475-3>
- [3] Siew, C., & Tanyimboh, T. T. (2012). Penalty-Free Feasibility Boundary Convergent Multi-Objective Evolutionary Algorithm for the Optimization of Water Distribution Systems. *Water Resources Management*, 26(15), 4485–4507. <https://doi.org/10.1007/S11269-012-0158-2/FIGURES/6>

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [4] Rocamora Osorio, C., Abadía Sánchez, R., & Ruíz Canales, A. (2008). *Ahorro y Eficiencia Energética en las Comunidades de Regantes*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)
- [5] Goldberg, D. E. (2006). Genetic algorithms. Pearson Education India.
- [6] Gutiérrez Reina, D., Tapia Córdoba, A., & Rodríguez del Nozal, Á. (2020). Algoritmos Genéticos con Python. MARCOMBO, S.L.

ANEXO A

Nomenclatura

EE	Estación Elevadora
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
C	Coste de la energía consumida en un día
E	Energía consumida durante una hora de bombeo
Ind	Array de valores binarios según activación (1) o no (0) del bombeo en dicha hora
C_h	Coste por unidad de energía consumida según periodo tarifario
Pen_{max}	Número de horas al día con más de 6000 o menos de 0 m^3 en el depósito de la EE
Pen_{dep}	Número de horas al día con menos de 1000 m^3 en el depósito de la EE
P_{PV}	Array de valores de potencia fotovoltaica en alterna para cada hora del día
η	Rendimiento de la instalación fotovoltaica
P_p	Potencia pico fotovoltaica instalada
α	Coefficiente de corrección térmica del desempeño del panel fotovoltaico
G_{total}	Irradiancia total
$G_{referencia}$	Irradiancia de referencia para el cálculo de potencia generada por un módulo
T_{ref}	Temperatura de referencia para el cálculo de potencia generada por un módulo
T	Temperatura