



APLICACIÓN ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA OPTIMIZACIÓN DE PATS EN REDES DE RIEGO

Mariana Akemi Ikegawa¹, Miguel Crespo Chacón², Juan Antonio Rodríguez
Díaz³, Pilar Montesinos Barrios⁴, Jorge García Morillo⁵

^{1,3,4,5}Departamento de Agronomía, Campus de Rabanales, Universidad de Córdoba,
Córdoba

²Easy Hydro, Dublin

¹p82ikikm@uco.es

RESUMEN

En este estudio se evalúa el uso de bombas funcionando como turbinas (Pumps as Turbines, PATs) en redes de riego presurizadas para la recuperación de energía hidráulica en puntos con exceso de presión. Para ello, se plantea el uso del algoritmo de optimización por enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization, PSO) para el dimensionamiento de las PATs en base a dos escenarios con funciones objetivo diferentes. En concreto, el dimensionamiento de las PATs se ha analizado con el fin de minimizar el periodo de retorno (PP) en primer lugar, y maximizar el ahorro energético en segundo lugar. Posteriormente, se presenta una exposición comparativa de los valores para cada punto y función objetivo de manera independiente desarrollada en el Sector II de la Comunidad de Regantes del Canal del Zújar (CZID), sito en Extremadura (España). Los resultados recogidos de la aplicación del proceso de optimización prevén ahorros energéticos en una horquilla de 9.554,86 kWh a 49.829,00 kWh en los diferentes puntos para las PATs resultantes de la función objetivo para maximizar el ahorro energético, y unos periodos de retorno que van desde los 12,92 años a los 3,37 años para la función minimizar la recuperación de la inversión.

Palabras clave

Ahorro Energético, Recuperación de Energía en Redes de Riego, Reducción del Periodo de Retorno de la Inversión.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución de agua en las redes de riego han sufrido, en los últimos años, un notable proceso de modernización, al objeto de mejorar la eficiencia en el uso del agua. Estos avances tecnológicos han venido acompañados necesariamente de un aumento en la demanda energética y en los costes energéticos del sector agrícola. En estas redes de riego complejas y extensas existen puntos con excesos de presión y por tanto, con elevado potencial de recuperación de energía. Este proceso de recuperación se puede realizar a través de la

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

instalación de un sistema de bombas que funcionen como turbinas (PATs, de sus siglas en inglés), que para pequeñas potencias ofrece una solución más económica si se compara con las turbinas tradicionales.

La viabilidad de estos sistemas depende, en gran medida, de conocer en detalle su curva de funcionamiento y la elección del modelo óptimo para cada sitio. En esta línea de investigación numerosos autores han estudiado de forma experimental la caracterización de las PATs [1]; a tal fin se desarrolló un modelo predictivo que estima el rendimiento de las bombas centrífugas utilizadas como turbinas mediante un método numérico unidimensional [2]; también se han propuesto modelos de predicción del rendimiento utilizando el principio de coincidencia rotor-voluta [3]; o a través de una metodología general para la predicción del rendimiento utilizando redes neuronales artificiales [4]; incluso se ha evaluado experimental y numéricamente una metodología para la predicción del rendimiento de las PATs que operan en condiciones fuera de su rango de diseño [5] y se ha desarrollado un modelo para la extrapolación de las curvas características de las bombas como turbinas a partir de su punto de máxima eficiencia (BEP) [6].

En este trabajo, se plantea aplicar el algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) para evaluar la instalación de PATs bajo dos escenarios con una función objetivo cada uno: i) minimizar el periodo de retorno; ii) y maximizar el ahorro de energía. Estas funciones se han aplicado a nueve posibles puntos con exceso de presión de una red real de riego y con distribución real de los caudales circulantes, y se han comparado los resultados obtenidos.

2. METODOLOGÍA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Los datos de caudal necesarios para el desarrollo del presente estudio se obtuvieron de la Zona Regable del Canal del Zújar, situado en Extremadura (España). Esta zona regable se extiende a lo largo de la margen izquierda del río Zújar hasta su desembocadura en el río Guadiana, siguiendo este hasta su confluencia con el río Machel, hasta abarcar una superficie de 20.870 ha. La superficie queda dividida en 10 sectores de riego a presión correspondientes a los municipios de Villanueva de la Serena, Don Benito, Medellín, Mengabril, Guareña, Valdetorres, Oliva de Mérida, Villagonzalo, La Zarza y Alange.

El motivo principal de la elección de este sector y esta zona de riego es que tiene instalado un sistema de telemetria que registra el caudal horario de agua demandado a través de caudalímetros instalados en los 196 hidrantes [8], lo que aporta una información con una resolución espacial y temporal rara vez disponible en este tipo de instalaciones. Estos registros a nivel de hidrante permiten obtener el caudal que discurre por cada tubería de la red y la presión en hidrante, así como su variación diaria y a lo largo de la campaña de riego, lo que permite diseñar de forma óptima plantas de recuperación de energía basada en PATs, y validar metodologías de selección de PATs desarrolladas para cuándo no se dispone de estos datos. Por este motivo, este sector ya ha sido utilizado en otros estudios previos, como la investigación [7] que sirve de base a este trabajo, en la que se identificaban nueve puntos con exceso de presión (Excess Pressure Points, EPP) de la red. En estos puntos se evaluó el potencial de recuperación de energía, obteniéndose los datos necesarios para el correcto estudio de la selección óptima de PATs en cada punto [9]. En este trabajo se utilizan los

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

mismos puntos de recuperación de energía para aplicar la metodología que a continuación se propone.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Dando continuidad a la importante investigación llevada a cabo en los últimos años sobre la aplicación de distintas metodologías para la selección óptima de PATs para redes de distribución de agua en el sector del riego [1,2,3,4,5,6], este estudio plantea dos escenarios de optimización con una función objetivo cada uno, que permitan la comparación directa entre los beneficios económicos del ahorro generado por la recuperación energética de las PAT en los EPPs y la minimización de los periodos de retorno de la inversión en función de las PATs instaladas en cada EPP. En cada escenario se obtiene una PAT óptima para cada una de las funciones en cada punto de estudio.

- Función Objetivo “Maximizar Ahorro”;

La función de maximizar el ahorro (AE) tiene por objeto identificar la PAT que asegure una mayor producción energética para cada punto EPP estudiado, lo que supondría el mayor ahorro energético posible, que se traduce en ahorro económico al considerar una tarifa de suministro contratada. Se asume el autoconsumo (ahorro), en lugar de la venta de energía a la red (ingresos), al considerar que en muchos casos la instalación no cuenta con puntos de conexión a la red cercanos [9].

En este caso trabajamos con datos reales de caudales y presiones de nueve EPP para los que se evaluó el potencial de recuperación de energía con PATs [7]. Se debe tener en cuenta una presión de servicio de la red adecuada, y se ha considerado que hay que garantizar una presión de 35 m.c.a. en todos los hidrantes de la red.

A fin de asegurar el caudal demandado en los hidrantes aguas abajo, se adopta el procedimiento empleado por Lydon [10,1], por el que se propone la instalación de un bypass equipado con dos válvulas de regulación hidráulica, que operen bajo la condición de que, cuando el caudal demandado aguas abajo sea igual o menor al caudal máximo a turbinar por la PAT seleccionada, todo el flujo pase por la turbina; mientras que, si el caudal demandado aguas abajo es mayor que el caudal máximo que puede turbinar la PAT, el exceso será desviado por el bypass, tal como indican las ecuaciones siguientes.

$$\text{Si } Q_i \leq Q_{MAX} \begin{cases} Q_{PAT} = Q_i \\ Q_{iBP} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{Si } Q_i > Q_{MAX} \begin{cases} Q_{PAT} = Q_{iPAT} \\ Q_{iBP} = Q_i - Q_{iPAT} \end{cases} \quad (2)$$

Para determinar el potencial de producción hidroeléctrica de cada EPP se incluyen en el procedimiento tres ecuaciones de cálculo. La ecuación (3), propuesta por Barbarelli [11] para estimar las curvas características de los PATs, con la que se calculan la presión disponible con relación a los caudales circulantes; la ecuación (4), propuesta por [6] para cálculo de la eficiencia relativa de la PAT”; y la ecuación (5), por la que se calcula la potencia generada dependiendo del caudal, exceso de presión disponible, y eficiencia relativa.

$$\frac{H_i}{H_{BEP}} = 0.922 \left(\frac{Q_i}{Q_{BEP}} \right)^2 - 0.406 \left(\frac{Q_i}{Q_{BEP}} \right) + 0.483 \quad (3)$$

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

$$\eta_i = 0.5197 \left(\frac{Q_{iPAT}}{Q_{BEP}} \right)^3 - 2.3328 \cdot \left(\frac{Q_{iPAT}}{Q_{BEP}} \right)^2 + 3.0931 \cdot \left(\frac{Q_{iPAT}}{Q_{BEP}} \right) - 0.2757 \quad (4)$$

$$P_i = 0.55 \cdot Q_{iPAT} \cdot H_{iPAT} \cdot \gamma \cdot \eta_i \quad (5)$$

Obtenida las potencias relativas generadas por la PAT para cada EPP ante cada caudal circulante, la producción energética anual vendrá determinada como sumatorio de las potencias calculadas por el periodo de tiempo, y se calculará el ahorro económico como producto de la potencia recuperada por el valor de una tarifa considerada.

- Función Objetivo “Minimizar Periodo de Retorno”.

La función de minimizar periodo de retorno (PR) tiene por objeto identificar la PAT que represente un menor periodo para la recuperación de la inversión inicial estimada para cada punto EPP estudiado.

Esta función objetivo comparte con la anterior gran parte del proceso de cálculo, estimando el ahorro económico correspondiente a la energía recuperada por la PAT propuesta y a la tarifa considerada en cada EPP. Posteriormente, se calculará el PR como el cociente entre el coste de la instalación y los ingresos estimados, para lo que deberá determinar los costes de instalación de cada PAT propuesta.

Para determinar el coste de la instalación se tienen en consideración el coste de los componentes electromecánicos (turbina + generador) y el coste de la obra civil necesaria para el correcto funcionamiento. Los costes de los componentes electromecánicos se determinan tomando la ecuación propuesta por Novara y McNabola [12] para una bomba con dos pares de polos magnéticos, ecuación (6), utilizada a su vez en otros trabajos [9] y [13].

$$C_{PP2l} = 12.864,77 \cdot Q_{iBEP} \cdot \sqrt{H_{BEP}} + 949,43 \quad (6)$$

Para determinar los costes derivados de la obra civil, se sigue la metodología propuesta por Crespo Chacón *et al.* [9], quienes proponen una valoración estimada de las partidas a considerar en la ejecución de las obras civiles necesarias para la instalación y funcionamiento de las PATs.

Finalmente, el proceso de optimización devolverá, como resultado de la función objetivo, la PAT que represente un menor periodo de retorno de la inversión calculada para cada punto estudiado. Las dos funciones objetivo propuestas proporcionan PATs óptimas distintas para cada EPP y objetivo, permitiendo a quien corresponda elegir la opción que mejor responda a su necesidad.

2.3 OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

El algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) es un método de optimización heurística [14] muy utilizado en ciencia e ingeniería para encontrar los mínimos y máximos globales de un sistema, y su funcionamiento se basa en el comportamiento colectivo de los animales en los que el movimiento de cada individuo es el resultado de combinar las decisiones individuales de cada uno con el comportamiento del resto. En el algoritmo, una partícula representa un individuo del enjambre y tiene un vector solución de posición, siendo el mejor global la mejor posición encontrada por el enjambre conseguida por cada partícula. Para conocer el mejor local se definen subconjuntos de partículas del enjambre, denominadas vecindad, en la que cada partícula conoce la mejor posición de su propio subconjunto. Una

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

vecindad define como las partículas interactúan entre ellas, y determina como la información se propaga en el enjambre afectando la convergencia del algoritmo [15].

Una vez introducidos todas las variables y definidas las ecuaciones que intervienen en el proceso de cálculo, se ejecutará el algoritmo de optimización por enjambre de partículas para las funciones “minimizar” periodo de retorno, y “maximizar” energía recuperada. Cada enjambre quedara definido por un numero de partículas y variables, y unos límites inferiores y superior definidos. La optimización de la función objetivo realizará el número de iteraciones necesario hasta cumplir el criterio de parada fijado, para el que se definen un numero de iteraciones a una tolerancia mínima de cambio, (5 iteraciones consecutivas con falta cambio absoluto mínimo de 0.001) o hasta alcanzar el número máximo de iteraciones definido en los criterios de optimización prefijados, devolviéndonos el valor óptimo para cada función objeto. Otros criterios por definir en el algoritmo de optimización serán inercia máxima, inercia mínima, peso cognitivo y peso social.

3. RESULTADOS

La optimización de las PATs a instalar en los 9 EPPs identificados en la red de estudio para los datos registrados en el año 2015, ha proporcionado ahorros energéticos en una horquilla de 9.554,86 kWh (EPP5) a 49.829,00 kWh (EPP3) al maximizar el ahorro, y unos periodos de retorno que van desde los 12,92 años del EPP5 a los 3,01 años del EPP3 para la función minimizar PR.

Tabla 1. PATs óptimas (caudal, presión) para cada función objetivo en el año de 2015

EPP	Maximizar AE			Minimizar PR		
	Posición Óptima		Valor Óptimo	Posición Óptima		Valor Óptimo
	Caudal (l/s)	Presión (mca)	KWh	Caudal (l/s)	Presión (mca)	Años
1	76,41	16,9	19358	56,95	13,76	6,98
2	86,76	21,0	42988	18,36	66,65	3,42
3	112,21	14,1	49829	87,22	14,10	3,01
4	84,04	31,1	33116	55,77	20,90	4,45
5	54,17	16,9	9555	40,95	14,17	12,92
6	87,07	7,1	10422	72,06	6,78	12,14
7	82,01	23,2	34226	60,60	18,62	4,26
8	107,37	17,0	45443	81,24	15,83	3,37
9	144,42	24,0	43992	89,38	14,06	3,82

Analizando los resultados obtenidos en ambas funciones objetivo en la siguiente Tabla 2 y calculando el periodo de retorno para la función de maximización de la energía, y la generación total para el caso de reducción del periodo de retorno se obtiene que la variación de energía recuperada en “minimizar periodo de retorno” frente a la potencial energía recuperada en “maximizar energía” oscila entre los 1.597,57 kWh y 18.394,05 kWh anuales; mientras que los periodos de retorno en comparación inversa (minimizar periodo de retorno frente a maximizar ahorro) oscilan entre los 0,14 y los 0,70 años. No obstante, estos valores

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

son sensibles a los costes unitarios de la energía dado que, con la tendencia creciente de los mismos en los últimos años, es previsible que los períodos de amortización sean aún menores.

Tabla 2. Comparación entre el período de retorno y la energía recuperada por las PATs óptimas según cada función objetivo en el año de 2015

EPP	Maximizar AE		Minimizar PR		Comprobaciones	
	AE (kWh)	PR (años)	AE (kWh)	PR (años)	Diferencia AE	Diferencia PR
1	19357,8	7,31	14251,8	6,98	5106,0	0,33
2	42988,3	3,58	34375,3	3,42	8613,0	0,15
3	49828,7	3,15	32305,6	3,01	17523,1	0,14
4	33116,1	4,95	29834,8	4,45	3281,3	0,50
5	9554,9	13,42	7957,3	12,92	1597,6	0,49
6	10421,7	12,42	8267,9	12,14	2153,8	0,29
7	34225,6	4,48	31431,2	4,26	2794,4	0,22
8	45442,9	3,53	28951,4	3,37	16491,5	0,15
9	43992,2	4,52	25598,1	3,82	18394,0	0,70

4. CONCLUSIONES

Las funciones objetivo propuestas en este artículo definen dos criterios de selección importantes a considerar para el diseño de instalaciones con PATs para puntos con exceso de presión. Si bien en futuras investigaciones podría ser interesante analizar la interrelación de múltiples objetivos, que proporcionaría una PAT óptima que cumpla varios criterios simultáneamente; el análisis segregado (funciones objetivo independientes) de estos dos criterios se adapta a las diferentes necesidades y contextos a analizar para cada situación, permitiendo dar respuesta a diferentes casuísticas para las cuales convenga primar un criterio u otro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido cofinanciado por el Programa Operativo FEDER 2014-2020 y por la Consejería de Economía, Conocimiento, Empresas y Universidad de la Junta de Andalucía con referencia 1380595-R.

ANEXO A

En este anexo A se expone la nomenclatura utilizada en el presente trabajo.

Nomenclatura

PAT	Bombas que funcionan como turbinas
BEP	Punto de Mayor Eficiencia
PP	Período de Retorno
AE	Ahorro Energético

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

EPP	Puntos de Exceso de Presión
PSO	Optimización por Enjambre de Partículas
MHP	Micro Hidroelectricidad
Q_i	Caudal demandado aguas abajo
Q_{MAX}	Caudal máximo a turbinar por la PAT
Q_{iBP}	Caudal desviado por el by-pass en función del caudal demandado aguas abajo
Q_{PAT}	Caudal que pasa por la PAT
Q_{iPAT}	Caudal turbinado por la PAT (caudal no desviado)
H_i	Salto hidráulico recuperado por la PAT
H_{BEP}	Salto hidráulico en el BEP
Q_{BEP}	Caudal en el BEP
η_i	Valor de la eficiencia relativa para cada par Q-H (rendimiento)
P_i	Potencia producida por cada PAT para cada par Q-H
H_{iPAT}	Salto Hidráulico de la curva teórica de la PAT
Q_{iBEP}	Caudal en el BEP en función del caudal demandado aguas abajo
γ	Peso específico del agua
C_{PP21}	Coste total de la instalación de los componentes electromecánicos de dos pares de polos para cada valor de caudal

REFERENCIAS

- [1] T. Lydon, P. Coughlan, A. McNabola, Pump-as-turbine: characterization as an energy recovery device for water distribution network, J. Hydrol. Eng. 143 (8) (2017a). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001316](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001316).
- [2] S. Barbarelli, M. Amelio, G. Florio, Predictive model estimating the performance of centrifugal pumps used as turbines, Energy 107 (2016) 103-121. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.122>.
- [3] S. Huang, G. Qiu, X. Su, J. Chen, W. Zou, Performance prediction of a centrifugal pump as turbine using rotor-volute matching principle, Renew. Energy 108 (2017) 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.045>.
- [4] M. Rossi, M. Renzi, A general methodology for performance prediction of pumps-as-turbines using Artificial Neural Networks, Renew. Energy 128 (2018) 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.060>.
- [5] M. Rossi, M. Renzi, Experimental and numerical assessment of a methodology for performance prediction of Pumps-as-Turbines (PaTs) operating in offdesign conditions, Appl. Energy 248 (2019) 555-566. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.123>.
- [6] D. Novara, A. McNabola, A model for the extrapolation of the characteristic curves of Pumps as Turbines from a datum Best Efficiency Point, Energy Convers. Manag. 174 (2018) 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.091>.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [7] Crespo Chacon M., Rodriguez Diaz J.A., Garcia Morillo J., McNabola A., Hydropower energy recovery in irrigation networks: Validation of a methodology for flow prediction and pump as turbine selection (2020) *Renewable Energy*, 147, pp. 1728-1738. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.119>.
- [8] R. Gonzalez Perea, E. Camacho Poyato, P. Montesinos, J.A. Rodriguez Diaz, Prediction of irrigation event occurrence at farm level using optimal decision trees, *Comput. Electron. Agric.* 157 (2019) 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.043>.
- [9] M. Crespo Chacon, J.A. Rodriguez Diaz, J. Garcia Morillo, A. McNabola, Pumps- Turbine selection methodology for energy recovery in irrigation networks: minimising the payback period, *Water* 11 (149) (2019) <https://doi.org/10.3390/w11010149>.
- [10] T. Lydon, P. Coughlan, A. McNabola, Pressure management and energy recovery in water distribution networks: Development of design and selection methodologies using three pump-as-turbine case studies, *Renew. Energy* 114 (2017b) 1038-1050. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.120>.
- [11] S. Barbarelli, M. Amelio, G. Florio, Experimental activity at test rig validating correlations to select pumps running as turbines in microhydro plants, *Energy Conversion and Management* 149 (2017) 781-797. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.013>.
- [12] D. Novara, A. Carravetta, A. McNabola, H.M. Ramos, A cost model for Pumps as Turbines in run-of-river and in-pipe energy recovery micro-hydropower applications, *J. Water Resour. Plan. Manag.* 145 (5) (2019), 04019012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001063](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001063).
- [13] Irene Fernández García; Rafael Gonzalez Perea; and Juan Antonio Rodríguez Díaz. New Model for Determining Optimal PAT Locations: Maximizing Energy Recovery in Irrigation Networks, *Journal of Water Resources Planning and Management* 11 (148) (2022). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001605](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001605).
- [14] Kennedy, J., Eberhart, R.: Particle Swarm Optimization. Proceedings of the 1995 IEEE international conference on neural networks (ICNN'95), Vol. 4, pp. 1942-1948 (1995) <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.
- [15] Ling, I.: Particle Swarm Optimization for Solving Constraint Satisfaction Problems. Thesis (M.Sc.), School of Interactive Arts and Technology, Simon Fraser University (2005)