

Metaheurísticas paralelas aplicadas al diseño de la red de sensores en plantas químicas

Carlos Bermudez¹, José Luis Hernandez², Mercedes Carnero²,
Gabriela Minetti¹, Carolina Salto¹

¹Laboratorio de Investigación en Sistemas Inteligentes (LISI)
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Pampa
e-mail: ¹{bermudezc, minettig, saltoc, @ing.unlpam.edu.ar}

²Grupo de Optimización (GOp)
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional Río Cuarto
e-mail: ²{jlh, mcarnero@ing.unrc.edu.ar}

Resumen En una planta química inteligente, conocer el estado del proceso en tiempo real es una tarea esencial y que impacta en aspectos tales como la economía, la seguridad y el control. La información es recolectada por sensores distribuidos por toda la planta, encargados de medir y transmitir los valores de variables asociados a temperatura, humedad, presión, composición entre otros. El conjunto de dispositivos utilizados en la medición se denomina red de sensores y su costo de adquisición es una componente importante del costo de capital, lo cual justifica la importancia de formular el diseño de la red de sensores como un problema de optimización y de contar con herramientas sistemáticas para su resolución. Por este motivo, esta línea de investigación se enfoca en el diseño y desarrollo de un algoritmo de optimización inteligente basado en un *Simulated Annealing* híbrido y paralelo (PHSA, por sus siglas en Inglés), aplicado a la resolución de una red de instrumentación de costo mínimo. El paralelismo se aplica a nivel algorítmico, siguiendo un modelo cooperativo. Entre los parámetros de migración, los criterios de reemplazo tienen un papel importante en el desempeño de PHSA. Nuestro principal objetivo es analizar el comportamiento de PHSA considerando diferentes criterios de reemplazo. Los resultados obtenidos por PHSA alcanza la mejor solución conocida para casos de redes de sensores grandes y complejas.

Palabras claves: Paralelismo, Metaheurísticas, Optimización, Red de sensores, Simulated Annealing, Hibridación

CONTEXTO

Esta línea de investigación se desarrolla en el marco de dos proyectos de investigación, acreditados en distintas universidades argentinas. Uno llevado a cabo en el Grupo de Optimización (GOp), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto. El segundo se desarrolla en el Laboratorio de Investigación de Sistemas Inteligentes (LISI), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Pampa.

El diseño de la red de sensores (SNDP, por sus siglas en Inglés) es considerado como elemento clave para hacer realidad la planta inteligente ([1]), ya que proporciona un conocimiento integral del estado actual del proceso. De manera general, el diseño sistemático de una red de sensores en una planta se formula como un problema de optimización ([2], [3]). Consiste en determinar para cada variable si debe medirse o no al tiempo que se optimiza un criterio de desempeño particular. Estos últimos pueden clasificarse como criterios asociados con la performance del sistema de sensores propiamente dicho ([4], [5]) o relacionados con indicadores del proceso para el cual está diseñada la instrumentación ([6], [7], [8]).

Para un problema dado, esto es una función objetivo y un conjunto de restricciones específicas, la cantidad de posibilidades en relación a cuántas y cuáles variables medir puede alcanzar valores muy altos incluso para plantas pequeñas, con un costo computacional asociado que puede resultar prohibitivo. Por ende, un aspecto importante se vincula

con la elección de la metodología de resolución, que se puede clasificar en dos grandes grupos: métodos exactos y métodos heurísticos. El análisis del rendimiento exhibido por los algoritmos exactos ([9], [3]) muestra que son dependientes del problema y de su tamaño. Es decir, no son lo suficientemente robustos como para resolver un amplio rango de especificaciones, ni tienen posibilidad de escalamiento. La desventaja más notoria de los algoritmos exactos es que en muchos casos no pueden garantizar la optimalidad. Esta limitación proviene principalmente de la naturaleza combinatoria del problema, lo que resulta en la imposibilidad de contar con algoritmos de tiempo polinomial para los casos de interés práctico. Por lo tanto, los métodos de optimización heurística emergen como la alternativa de solución más factible para abordar diseños de mayor dimensión ([10], [11], [12]).

El proceso de optimización en el diseño de SN para instancias de gran tamaño puede requerir de estrategias para reducir el tiempo de ejecución del proceso. En consecuencia, se utilizan técnicas de paralelización sobre los métodos heurísticos ([13]), consiguiendo una mejora sustancial en el tiempo dedicado a dicha optimización.

En esta línea de investigación se propone un algoritmo *Simulated Annealing* (SA) ([14], [15]) paralelo para optimizar el SNDP. En este modelo, muchos algoritmos *Simulated Annealing* híbridos (HSA) ([16]) se lanzan en paralelo e intercambian información para mejorar la calidad de las soluciones y aumentar la eficiencia. En consecuencia, la principal contribución de nuestra investigación es el desarrollo de un algoritmo inteligente basado en un SA híbrido y paralelo, denominado PHSA, que se utilice para la toma de decisiones durante el diseño de redes de sensores complejas en grandes plantas químicas.

1. DESARROLLO

En esta sección se describe la línea de investigación ya mencionada, introduciendo una explicación detallada del problema y del algoritmo propuesto para resolverlo.

A. Problema de diseño de la red de sensores

El SNDP se puede definir como el problema de encontrar una estructura de sensores que satisfaga

un conjunto de restricciones a la vez que se optimiza un criterio de desempeño determinado. Una formulación particular en la que se ha trabajado es aquella donde se pretende diseñar una red de instrumentación de costo mínimo que satisfaga restricciones de precisión y estimabilidad sobre un conjunto de variables claves. Formalmente, el problema de SNDP se puede expresar como se muestra en la Ecuación (1), donde \mathbf{q} es un vector n -dimensional de variables binarias tal que $q_i = 1$ si se mide la variable i y $q_i = 0$ en caso contrario; \mathbf{c}^T es el vector de costo; $\hat{\sigma}_k$ es el desvío estándar de la variable k contenida in S_σ después de aplicar un procedimiento de conciliación de datos ([17]), y E_l representa el grado de estimabilidad de la variable l -ésima incluida en S_E . Además, S_σ y S_E son el conjunto de variables clave del proceso con requisitos de precisión y capacidad para estimarse, respectivamente.

$$\min \mathbf{c}^T \mathbf{q} \quad (1)$$

sujeto a:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_k(\mathbf{q}) &\leq \sigma_k^*(\mathbf{q}) && \forall k \in S_\sigma \\ E_l &\geq 1 && \forall l \in S_E \\ \mathbf{q} &\in \{0, 1\}^n \end{aligned}$$

En esta formulación, se supone que un modelo algebraico lineal representa la operación de la planta, las mediciones están sujetas a errores aleatorios no correlacionados, solo hay un dispositivo de medición potencial para cada variable y no hay restricciones para la localización de instrumentos. Con respecto al grado de restricción de estimabilidad, si $E_l=1$, la factibilidad de la restricción se puede comprobar mediante la ejecución de un procedimiento de clasificación de variables, que se puede lograr mediante la proyección de matrices, la descomposición QR o la cooptación de matrices ([18], [19]).

B. Algoritmo PHSA

PHSA se basa en HSA, (*Hybrid Simulated Annealing*) ([16]), que funciona como metaheurística principal con una búsqueda local ad hoc subordinada, inspirada en la búsqueda tabú con la técnica de oscilación estratégica, SOTS. El algoritmo PHSA

propuesto sigue un modelo de paralelización a nivel algorítmico (ver [13]). PHSA consiste en n HSAs ejecutados en paralelo, que intercambian información para mejorar la calidad de las soluciones y la eficiencia. Por lo tanto, el diseño de PHSA sigue una estrategia de búsqueda cooperativa.

Cada HSA genera su solución inicial S_0 y se ejecuta de forma independiente, intercambiando información entre ellos para encontrar soluciones mejores y más robustas. Se pueden usar diferentes topologías de interconexión, pero nos enfocamos en la topología de anillo, por lo que llamamos a nuestra propuesta PHSA_ring; donde los n HSAs se organizan en un anillo lógico unidireccional. El i -ésimo HSA envía su solución actual S_1 a su vecino, el $(i+1)$ -ésimo HSA, en el anillo con una frecuencia determinada y después de un intercambio asíncrono. El HSA que recibe una solución (S_2) utiliza un determinado criterio de reemplazo para aceptarla o no; luego continúa con su proceso de búsqueda independiente.

En esta investigación, consideramos tres diferentes criterios de reemplazo ([20]), denominados *RC1*, *RC2* y *RC3*.

- *RC1*. S_2 se acepta con la probabilidad de Boltzmann.
- *RC2*. S_2 se acepta si es mejor que la solución actual (S_1).
- *RC3*. S_2 se acepta si es mejor que la solución local mejor encontrada (S_b).

2. RESULTADOS OBTENIDOS

El desempeño de PHSA_ring se evalúa considerando procesos químicos de alta complejidad y tamaño. Como primer caso de estudio, se abordó una planta de etileno simplificada, compuesta por 47 unidades y 82 corrientes, cuyo funcionamiento solo se representa a través de balances de masa globales. En segundo lugar, se utilizó el Proceso Eastman de Tennessee (TEP) ([21]), un problema ampliamente considerado en la literatura de monitoreo y control de procesos químicos. Tanto los balances de masa globales como los de componentes se consideran en el TEP. El sistema completo comprende 42 ecuaciones linealizadas alrededor del punto de operación y un total de 78 variables. En el primer caso de estudio, se observa un conjunto de 14 variables requeridas con restricciones de precisión en 6 de ellas. El

segundo caso de estudio considera un conjunto de 24 variables requeridas, todas ellas con restricciones de precisión. La desviación estándar de los caudalímetros es del 2% de los caudales reales correspondientes para ambos casos.

El desempeño de PHSA_ring se evalúa, empíricamente y con soporte estadístico, en términos de calidad de la solución, tiempo de ejecución y cantidad de evaluaciones ([22]). En función a lo evaluado, se observó que PHSA_ring encontró los mejores costos de solución conocidos. Como consecuencia, un modelo basado en HSA cooperativos a nivel algorítmico resulta ser una excelente opción para resolver este problema. Las diferentes pruebas estadísticas demostraron que el *RC3* permitió mejorar significativamente la calidad de la solución. Finalmente, al evaluar la eficiencia de PHSA_ring, al considerar las tasas de aciertos y las medidas de *speedup* [23], se confirma que PHSA_ring mantuvo la propiedad de escalabilidad porque su rendimiento mejoró al aumentar la cantidad de HSA y los valores de *speedup* fueron casi lineales.

3. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

Cada año se incorporan a los proyectos alumnos avanzados en la carrera Ingeniería en Sistemas, quienes trabajan en temas relacionados a la resolución de problemas de optimización usando técnicas inteligentes, con el objeto de guiarlos en el desarrollo de sus tesis de grado y, también, de formar futuros investigadores científicos. Por otra parte, los docentes-investigadores que integran los proyectos realizan diversos cursos de posgrado relacionados con la temática del proyecto, con el objetivo de sumar los créditos necesarios para cursar carreras de posgrado.

REFERENCES

- [1] P. Christofides, J. Davis, N. El-Farra, D. Clark, H. K., and J. Gipson, "Smart plant operations: Vision, progress and challenges." *AICHE J*, vol. 53, pp. 2734–2741, 2007.
- [2] M. Bagajewicz, "Design and retrofit of sensor networks in process plants," *AICHE Journal*, vol. 43, no. 9, pp. 2300–2306, 1997.
- [3] D. Nguyen and M. Bagajewicz, "New efficient breadth-first/level traversal tree search method for the design and upgrade of sensor networks," *AICHE Journal*, vol. 57, no. 5, pp. 1302–1309, 2011.

- [4] M. Carnero, J. L. Hernández, and M. Sánchez, "Optimal sensor location in chemical plants using the estimation of distribution algorithms," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 57, no. 36, pp. 12 149–12 164, 2018.
- [5] P. Kotecha, M. Bhushan, R. Gudi, and M. Keshari, "A duality based framework for integrating reliability and precision for sensor network design," *Journal of Process Control*, vol. 18, no. 2, pp. 189–201, 2008.
- [6] P. Sen, K. Sen, and U. M. Diwekar, "A multi-objective optimization approach to optimal sensor location problem in IGCC power plants," *Applied Energy*, vol. 181, pp. 527–539, 2016.
- [7] P. Paul, D. Bhattacharyya, R. Turton, and S. E. Zitney, "Sensor network design for maximizing process efficiency: an algorithm and its application," *AIChE Journal*, vol. 61, no. 2, pp. 464–476, 2015.
- [8] G. Sambito, M. and Freni, "Strategies for improving optimal positioning of quality sensors in urban drainage systems for non-conservative contaminants," *Water*, vol. 13, pp. 1–14, 2021.
- [9] J. Zhang and D. J. Chmielewski, "Profit-based sensor network design using the generalized benders decomposition," in *2017 American Control Conference (ACC)*, 2017, pp. 3894–3899.
- [10] J. Hernandez, C. Salto, G. Minetti, M. Carnero, and M. C. Sanchez, "Hybrid simulated annealing for optimal cost instrumentation in chemical plants," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 74, pp. 709–714, May 2019.
- [11] Y.-J. He and Z.-F. Ma, "Optimal design of linear sensor networks for process plants: A multi-objective ant colony optimization approach," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 135, pp. 37–47, 2014.
- [12] Á. Panizo, G. Bello-Organ, M. Carnero, J. Hernández, M. Sánchez, and D. Camacho, "An artificial bee colony algorithm for optimizing the design of sensor networks," in *Intelligent Data Engineering and Automated Learning – IDEAL 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 316–324.
- [13] E. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*. Wiley Publishing, 2009.
- [14] S. Kirkpatrick, C. G. Jr, and M. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, no. 220, pp. 671–680, 1983.
- [15] V. A. Cicirello, "Variable annealing length and parallelism in simulated annealing," *CoRR*, vol. abs/1709.02877, 2017.
- [16] J. L. Hernández, C. Salto, G. F. Minetti, M. Carnero, C. Bermúdez, and M. Sánchez, "Tuning a hybrid sa based algorithm applied to optimal sensor network design," *Journal of Computer Science & Technology*, vol. 20, no. 1, 2020.
- [17] M. Bagajewicz and M. Sanchez, "Reallocation and upgrade of instrumentation in process plants," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 24, no. 8, pp. 1945 – 1959, 2000.
- [18] J. Romagnoli and M. Sanchez, *Data Processing and Reconciliation for Chemical Process Operations*. Academic Press: San Diego, CA, 2000.
- [19] S. Narasimhan and C. Jordache, *Data Reconciliation and Gross Error Detection*. Gulf Publishing Company, 2000.
- [20] C. Bermudez, H. Alfonso, G. Minetti, and C. Salto, "A parallel optimization solver for the multi-period wond problem," in *Hybrid Artificial Intelligent Systems*, H. Sanjurjo González, I. Pastor López, P. García Bringas, H. Quintián, and E. Corchado, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 625–636.
- [21] J. Downs and E. Vogel, "A plant-wide industrial process control problem," *Comp. Chem. Eng.*, vol. 17, pp. 245–255, 1993.
- [22] C. Bermudez, H. Alfonso, G. Minetti, and C. Salto, "A parallel optimization solver for the multi-period wond problem," in *Hybrid Artificial Intelligent Systems*, H. Sanjurjo González, I. Pastor López, P. García Bringas, H. Quintián, and E. Corchado, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 625–636.
- [23] E. Alba, "Parallel evolutionary algorithms can achieve super-linear performance," *Inf. Process. Lett.*, vol. 82, pp. 7–13, 2002.