

## OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA APLICADA A LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE SELECCIÓN DE INSTRUMENTACIÓN EN PLANTAS DE PROCESO

Mercedes Carnero<sup>1</sup>, José Hernández<sup>1</sup> y Mabel Sánchez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto,  
Campus Universitario, (5800) Río Cuarto, Argentina  
[mcarnero@ing.unrc.edu.ar](mailto:mcarnero@ing.unrc.edu.ar); [jlhernandez@ing.unrc.edu.ar](mailto:jlhernandez@ing.unrc.edu.ar)

<sup>2</sup> Planta Piloto de Ingeniería Química (UNS- CONICET),  
Camino La Carrindanga Km 7, (8000) Bahía Blanca, Argentina  
[msanchez@plapiqui.edu.ar](mailto:msanchez@plapiqui.edu.ar)

**Palabras Clave:** Diseño de redes de sensores, Reconciliación de datos, Búsqueda tabú, Meta-heurísticas.

**Resumen.** *En este trabajo se presenta una nueva estrategia para el diseño y actualización de redes de sensores en plantas de proceso. Se propone una heurística de Búsqueda Tabú para determinar la localización óptima de una red de sensores con costo mínimo de adquisición sujeto a restricciones de precisión sobre un conjunto de variables clave, con una técnica alternativa de intensificación y diversificación basada en reencadenamiento de camino. Esta última permite obtener la mejor solución para el problema de diseño analizado durante nuestra investigación, permitiendo además una reducción significativa del número requerido de llamadas a la función de evaluación.*

## 1 INTRODUCCION

La disponibilidad de información en plantas de proceso es indispensable para la ejecución de un conjunto de actividades propias de la industria tales como la aplicación de la optimización en línea, el control estadístico de procesos, los sistemas de diagnóstico de fallas, el mantenimiento predictivo y basado en la confiabilidad.

En vista de los beneficios conseguidos con la utilización de información más exacta y precisa del proceso, tanto en el plano económico como en el de la seguridad y medio ambiente, es necesario dirigir la atención hacia el origen de la información, es decir, el conjunto de instrumentos instalados en la planta.

El diseño de estructuras de sensores en plantas de proceso, consiste en la selección del tipo, número, exactitud, confiabilidad y localización de nuevos instrumentos que suministren la cantidad y calidad de información requerida para el proceso.

Para la resolución de este problema de optimización combinatoria se han presentado diferentes estrategias tanto determinísticas como estocásticas. Las estrategias determinísticas exploradas han sido Algoritmos Exponenciales y Algoritmos de Búsqueda Local. Dentro del primer grupo merecen citarse: 1) el procedimiento basado en la enumeración implícita con criterio de terminación propuesto por Bagajewicz (1997) para resolver ejemplos académicos y, 2) la estrategia Branch and Bound utilizada para resolver problemas de optimización de tamaño pequeño con funciones objetivo lineales y restricciones convexificadas (Bagajewicz y Cabrera, 2002; Chmielewski *et al.*, 2002). Los algoritmos de búsqueda de óptimos locales en la vecindad de un punto (Narasimhan y Jordache, 2000) se restringieron a resolver problemas en los cuales el número de sensores a instalar se fija a priori. La estrategia Branch and Bound supera a las restantes técnicas determinísticas en eficiencia y generalidad de aplicación. Estas estrategias resultan aplicables a instancias del problema de tamaño relativamente pequeñas, ya que a medida que se aumenta el número de corrientes involucradas el tiempo de cómputo asociado se torna inadmisibles.

En este contexto los métodos de optimización estocásticos se presentan como una alternativa para abordar el diseño de sectores de plantas de gran escala cuando se consideran funciones de desempeño y restricciones complejas.

Las metodologías basadas en algoritmos genéticos (AG) han sido utilizadas para resolver el problema de diseño de estructuras de sensores generales. Recientemente Chao-An et al. (2003) presentaron un procedimiento para maximizar la disponibilidad de la red sujeta a restricciones de costo y precisión sobre un conjunto de variables clave, sin embargo sólo se resuelve el problema planteado para redes de tamaño pequeño utilizando el enfoque clásico. En contraste Carnero et. al (2004) desarrollaron un procedimiento híbrido para minimizar el costo de instrumentación durante su ciclo de vida sujeto a restricciones de precisión y disponibilidad. Además Gerkens y Heyen (2004) han presentado técnicas de algoritmos genéticos paralelos.

El procedimiento de Búsqueda Tabú es una estrategia de optimización estocástica basada en el uso de memoria adaptiva (Glover, 1986) que ha mostrado ser efectivo en la resolución de problemas de optimización duros como el problema del viajante de comercio (TSP), diseño de redes de telecomunicaciones y problemas de scheduling.

Recientemente han aparecido algunas aplicaciones de esta técnica en la resolución de problemas en ingeniería química (Lin y Miller (2004a,b), Teh y Rangaiah (2003), Cavin et al. (2004)).

En este trabajo se propone una heurística de Búsqueda Tabú para determinar la localización óptima de una red de sensores con costo mínimo de adquisición sujeto a restricciones de precisión sobre un conjunto de variables clave, con una técnica alternativa de intensificación y diversificación basada en reencadenamiento de camino. Esta última ha sido utilizada en trabajos recientes (Ghamlouche, 2004) aplicada a la resolución de problemas complejos con resultados satisfactorios en relación a la calidad de las soluciones encontradas y a la disminución del número requerido de llamadas a la función de evaluación.

La estructura del presente trabajo es la siguiente: en la Sección 2 se introduce brevemente el problema de diseño de redes de sensores en estudio, en la Sección 3 se describe la nueva estrategia de resolución propuesta. En la sección 4 se presenta la aplicación a un caso de estudio. Finalmente en la Sección 5 se presentan las conclusiones.

## 2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema de diseño de redes de sensores de mínimo costo que satisfacen restricciones de estimabilidad y precisión sobre un conjunto de variables clave puede formularse como sigue:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} && \mathbf{c}^T \mathbf{q} \\
 & \text{s.t.} && \\
 & && \hat{\sigma}_j(\mathbf{q}) \leq \sigma_j^*(\mathbf{q}) \quad \forall j \in S_J \\
 & && E_k(\mathbf{q}) \geq 1 \quad \forall k \in S_K \\
 & && q_i = 1 \quad \forall i \in I_0 \\
 & && \mathbf{q} \in \{0,1\}^{n-|I_0|}
 \end{aligned} \tag{1}$$

donde  $\mathbf{q}$  es un vector  $(n- I_0)$  dimensional de variables binarias tal que:  $q_i = 1$ , si la variable  $i$  es medida y  $q_i = 0$  de otro modo;  $\mathbf{c}^T$  es el vector de costo;  $\hat{\sigma}_j$  es el desvío estándar de la  $j$ -th variable estimada luego de que se aplica un procedimiento de reconciliación de datos y  $E_k$  representa el grado de estimabilidad de la variable  $k$  (Bagajewicz and Sánchez, 1999). Las restricciones de estimabilidad y precisión se imponen sobre los flujos pertenecientes a los subconjuntos  $S_J$  y  $S_K$ ,  $I_0$  representa el conjunto inicial de instrumentos el cual es vacío en esta etapa del diseño de la red de instrumentos.

La dimensión del espacio de búsqueda asociado al problema de optimización combinatorio planteado en (1) se incrementa significativamente para el caso de plantas de proceso de tamaño considerable, por lo que resulta imprescindible contar con métodos de resolución capaces de proporcionar soluciones de calidad en tiempos de cómputo razonables.

### 3 LA HEURÍSTICA DE BÚSQUEDA TABÚ

La Búsqueda Tabú (TS) es una técnica metaheurística que utiliza un procedimiento de búsqueda local para explorar el espacio de soluciones, junto con mecanismos de memoria adaptiva diseñados para evitar el estancamiento en mínimos locales y la visita cíclica de las mismas soluciones. La información histórica acerca del proceso de búsqueda de soluciones es almacenada en las llamadas listas tabú.

A partir de una solución inicial ( $\mathbf{q}_0$ ), se define en cada iteración una vecindad de posibles soluciones,  $N(\mathbf{q})$ , modificando la solución corriente a través de una secuencia de movimientos.

Los elementos de dicha vecindad son examinados para determinar el mejor de ellos que está ausente de la lista tabú, ( $\mathbf{q}'$ ). Esta solución es seleccionada como punto de partida para una nueva iteración aún cuando no mejore la solución anterior  $\mathbf{q}$ , a la vez que se guarda la mejor solución encontrada hasta el momento ( $\mathbf{q}^*$ ).

El método lleva un registro de los movimientos efectuados para alcanzar  $\mathbf{q}'$  desde  $\mathbf{q}$  en cada iteración. Esta *memoria* del proceso modifica la generación de la vecindad determinando que soluciones pueden ser alcanzadas por un movimiento a partir de la solución corriente. Normalmente esto se lleva a cabo a través de una lista de movimientos temporalmente prohibidos llamada lista tabú basada en lo reciente, la cual se actualiza en cada iteración. Pasado un cierto número de iteraciones, llamado período tabú ( $pt$ ), el movimiento es nuevamente permitido. La lista tabú representa la memoria a corto plazo del proceso. El estado tabú asociado a un movimiento puede eventualmente ser revocado si se satisface algún criterio de aspiración como por ejemplo la generación de una solución de mejor calidad que cualquier otra visitada previamente durante la búsqueda.

En contraste, la lista tabú basada en la frecuencia con que ciertos movimientos son realizados, representa la memoria a largo plazo de la técnica y permite la diversificación de la búsqueda al seleccionar movimientos que han sido menos utilizados o nunca se han elegido.

En algunas aplicaciones, TS básico puede ser suficiente; sin embargo existen otras en las cuales es necesaria la incorporación de otras estrategias adicionales para favorecer la búsqueda. En este sentido la técnica de reencadenamiento de caminos (*path relinking*, PR) es un método que permite incorporar en la búsqueda aspectos de intensificación y diversificación.

*Path relinking* fue introducido por Glover y Laguna (1993) en el contexto de búsqueda tabú y ha sido utilizado con éxito en la resolución de problemas complejos (Glover, 1997; Glover, Laguna, y Marti, 2000, Ghamlouche, 2004). Opera sobre un conjunto de soluciones de alta calidad encontrado previamente, llamado conjunto de referencia. A partir de dos soluciones pertenecientes a dicho conjunto, una de ellas llamada solución guía y la otra denominada inicial, se genera un camino desde la inicial a la solución guía utilizando sus atributos para guiar la generación de soluciones intermedias. La suposición subyacente del método es que las buenas soluciones comparten determinados atributos y que la combinación de ellos generará soluciones superiores a aquellas que pertenecen al conjunto de referencia inicial y eventualmente a la mejor encontrada hasta el momento.

En este trabajo se propone para resolver el problema de diseño de redes de sensores

general representado por la ecuación (1), utilizar una heurística de Búsqueda Tabú junto con una técnica de *path relinking*.

En las siguientes subsecciones se describe la implementación de la estrategia seleccionada.

### 3.1 Generación de la solución inicial

La generación de una solución inicial factible se realizó aplicando un procedimiento desarrollado por Carnero et al (2005), utilizado en trabajos previos para inicializar la población de un Algoritmo Genético. Este procedimiento permite generar un conjunto de soluciones que satisfacen la condición de estimabilidad de las variables pertenecientes a los conjuntos  $S_J$  y  $S_K$ . La mejor solución encontrada, se selecciona como solución inicial para el método de búsqueda tabú.

### 3.2 Definición de la Vecindad

Dada una solución  $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  la vecindad de  $\mathbf{q}$  se define como el conjunto de todas las soluciones  $\mathbf{q}'$  que corresponden a agregar o quitar una medición a la propuesta corriente. Esto corresponde al conjunto de soluciones cuya distancia de Hamming respecto de  $\mathbf{q}$  es igual 1. En símbolos:

$$N(\mathbf{q}) = \{ \mathbf{q}' / q'_i = \text{no } (q_i) \text{ para cualquier índice } i \text{ y } q'_j = q_j \forall i \neq j \}$$

### 3.3 Función de Evaluación

Dado que un movimiento puede originar un solución no factible, un elemento de la vecindad es evaluado utilizando una función  $F$  que tiene en cuenta las violaciones a las restricciones de la siguiente forma:

$$F = \begin{cases} \mathbf{c}^T \mathbf{q} & \text{si } \mathbf{q} \text{ es factible} \\ CT_{\max} + Q(\mathbf{q}) & \text{si } \mathbf{q} \text{ es no factible} \end{cases} \quad (2)$$

Donde

$$Q(\mathbf{q}) = \begin{cases} (CT_{\max} - \mathbf{c}^T \mathbf{q}) \left( \frac{ncu}{nr} \right) & \text{si } \mathbf{q} \text{ no satisface restricciones de estimabilidad} \\ \mathbf{c}^T \mathbf{q} \left( \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{\sigma_r - \sigma_r^*}{\sigma_r} \right) & \text{si } \mathbf{q} \text{ satisface estimabilidad pero no restricciones de precision} \end{cases} \quad (3)$$

$CT_{\max}$  es el costo de medir todas las variables del proceso,  $L$  y  $ncu$  corresponden al número de variables en  $S_J$  y  $S_K$ , respectivamente, cuyas restricciones no se satisfacen,  $nr$  es el número de variables pertenecientes al conjunto  $S_K$ .

### 3.4 Memorias de corto y largo plazo

La lista Tabú de memoria reciente es un vector de dimensión  $(n-I_0)$ . Una componente de valor distinto de cero indica que el movimiento asociado está prohibido dado que fue modificado recientemente. Su valor es el número de iteraciones que restan para permitir nuevamente dicho movimiento. Dicha cantidad está prefijada y se denominado período tabú ( $pt$ ).

La lista basada en frecuencia está representada por un vector  $\mathbf{h}$  de dimensión  $(n- I_0)$ . La  $i$ -ésima componente de  $\mathbf{h}$  almacena el número de movimientos de la variable  $i$  usados para generar la próxima solución durante  $ph$  iteraciones. Si el proceso de búsqueda se estanca en un área específica, es necesario dirigir la búsqueda a regiones no visitadas o visitadas con menor frecuencia. En consecuencia el valor de la función de evaluación correspondiente al  $i$ -ésimo movimiento permitido es penalizado en proporción a  $h_i$ . Luego de  $ph$  iteraciones el vector  $\mathbf{h}$  es reinicializado.

### 3.5 Criterios de Aspiración y Detención

El estado tabú asociado a un movimiento puede ser revocado si la solución generada a partir de dicho movimiento es mejor en términos de su valor de función de evaluación que aquella correspondiente a  $\mathbf{q}^*$ .

El criterio de detención utilizado es finalizar el procedimiento cuando ha transcurrido un determinado número de iteraciones sin encontrar ninguna solución mejor que  $\mathbf{q}^*$ .

### 3.6 Técnica de Reencadenamiento de Caminos

La implementación del método de reencadenamiento de caminos involucra los siguientes componentes:

- a) reglas para generar un conjunto de referencia  $R$
- b) reglas para elegir las soluciones inicial y guía
- c) definir una estructura de vecindades adecuada para moverse a lo largo del camino

Se han propuesto diferentes estrategias para la construcción del conjunto de referencia (Ghamlouche, 2004), ya que la decisión sobre la calidad y diversidad de las soluciones a incluir en el mismo tiene gran importancia sobre la calidad de las nuevas soluciones generadas. En este trabajo, el conjunto  $R$  es generado durante la fase de la búsqueda tabú básica y enriquecido durante la fase de *path relinking*. La implementación de la estrategia seleccionada para su construcción se describe a continuación:

- 1- Se genera un conjunto auxiliar  $P$  que contiene las mejores soluciones encontradas en una etapa dada del procedimiento de búsqueda tabú.
- 2 – Se construye el conjunto de referencia  $R$  de tamaño  $R_{\max}$  a partir de  $P$  de la siguiente forma:
  - 2a) Llenar la primera porción de  $R$  con las  $R_{\max}/2$  mejores soluciones de  $P$
  - 2b) Completar el conjunto  $R$  con aquellas soluciones  $\mathbf{p} \in \{P \setminus R\}$  tales que para cada elemento  $\mathbf{q} \in R$  la distancia de Hamming entre  $\mathbf{q}$  y  $\mathbf{p}$  sea mayor que cierto valor  $\delta$  prefijado

Las soluciones guía e inicial fueron elegidas como la mejor y la peor respectivamente, dentro del conjunto  $R$ .

La idea principal en PR es introducir progresivamente atributos de la solución guía en la solución inicial a través de una estructura de vecindades adecuada. En este problema se consideraron dos tipos de movimientos. En el primero, dada una propuesta de medición representada por la solución  $q$ , se incorpora o elimina una medición a dicha propuesta. El segundo tipo de movimiento tiene en cuenta el intercambio entre variables medidas y no medidas, de tal forma que el número de mediciones presentes en la solución corriente  $q$  no se altera.

El procedimiento de TS invoca a PR cada determinado número de iteraciones,  $frecpr$ , el cual se detiene cuando la cardinalidad del conjunto de referencia  $R$  es igual a 1.

#### 4 EJEMPLO DE APLICACIÓN

El procedimiento descrito anteriormente fué aplicado a la resolución de un problema de diseño de redes de instrumentación de una planta de etileno simplificada. El proceso involucra 82 corrientes y 47 unidades. Se supone que el desvío estándar asociado a cada caudalímetro es del 2.5% del valor verdadero del flujo. Las restricciones de precisión impuestas son las siguientes:  $\sigma_{10}^* = 1584.2$ ,  $\sigma_{17}^* = 1359.6$ ,  $\sigma_{35}^* = 200.7$ ,  $\sigma_{39}^* = 1580.6$ ,  $\sigma_{56}^* = 122.72$ ,  $\sigma_{69}^* = 1284.4$ .

Se utilizó como límite inferior para la restricción de estimabilidad sobre las corrientes [5 12 14 35 37 44 62 70 77], un valor de 1.

Los valores asignados a los parámetros fueron los siguientes:  $pt=9$ ;  $ph=60$ ;  $R_{max}=10$ ;  $\delta=4$ ;  $frecpr=25$

Los resultados obtenidos con la estrategia de PR fueron comparados con los alcanzados utilizando un procedimiento basado en Algoritmos Evolutivos (AE) desarrollado por Carnero et al. (2005) que combina los beneficios de una población estructurada en forma de vecindades junto con una estrategia de búsqueda local en algún estadio del algoritmo.

El desempeño de ambos métodos se muestra en la tabla 1 en términos del valor de la función objetivo alcanzado en cada caso, esto es el costo total  $CT$ , y el número de llamadas a la función de evaluación (#FE). Se observa que PR obtiene una solución de mejor calidad utilizando un 30% menos de llamadas a la función de evaluación que el enfoque evolutivo.

Procedimiento	Mediciones	$CT$	# FE
PR	1 2 5 10 12 15 21 30 33-35 37 44 45 50 54- 56 60 62 64-68 74- 78 82	50846.39	14091
AE	1 2 5 9 13 15 21 30 33-35 37 44 45 52 54-56 60 62 64-68 74 - 78 82	50856,4	20000

Tabla 1. Comparación de resultados obtenidos por PR y AE

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una nueva estrategia para el diseño de redes de instrumentación en plantas de proceso. Se utilizó una heurística de Búsqueda Tabú junto con un procedimiento de reencadenamiento de caminos como alternativa para incorporar aspectos de intensificación y diversificación al método. Su desempeño se comparó con otra heurística existente inspirada en algoritmos evolutivos.

Los resultados indican que la estrategia presentada muestra buena capacidad de exploración y explotación de regiones atractivas del espacio de búsqueda dado que obtiene una solución de mejor calidad con un esfuerzo computacional sensiblemente menor.

Estas características hacen que la implementación de meta-heurísticas basadas en la filosofía de búsqueda tabú resulte atractiva para la resolución de problemas de diseño de sensores de gran escala

## 6 REFERENCIAS

- Bagajewicz, M. “Design and Retrofit of Sensor Networks in Process Plants”. *AIChE J.*, **43**, 2300-2306, (1997).
- Bagajewicz, M. and E. Cabrera, “New MILP Formulation for Instrumentation Network Design and Upgrade”, *AIChE Journal* **48**, 2271, (2002).
- Bagajewicz, M.; M. Sánchez, , Cost Optimal Design and Upgrade of Non-Redundant and Redundant Linear Sensor Networks, *AIChE J.*, **45**, 1927, (1999).
- Carnero, M., J. Hernández y M. Sánchez, “Availability of Key Process Variable Estimates: An Evolutionary Approach”. *Proceedings of Escape 14 Congress*, Lisboa, Portugal, (2004).
- Carnero, M., J. Hernández and M. Sánchez, “On the Solution of the Instrumentation Selection Problem”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **44**, 358-367, (2005).
- Cavin, L., U. Fischer, F. Glover and K. Hungerbuhler, “Multiobjective Process Design in Multi-purpose Batch Plants using a Tabu Search Optimization Algorithm”, *Computers and Chemical Engineering*, **28**, 459. (2004).
- Chao-An, L., C. Chuei-Tin, K. Chin-Leng and C. Chen-Liang, “Optimal Sensor Placement and Maintenance for Mass-Flow Networks”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **42**, 4366. (2003).
- Chmielewski, D.; T. Palmer y V. Manou-siouthakis, “On the Theory of Optimal Sensor Placement”, *AIChE J.*, **48**, 1001–1012. (2002).
- Gerkens, C. and G. Heyen, “Use of Parallel Computers in Rational Design of Redundant Sensor Networks”, *Escape 14 Congress*, Lisboa, Portugal, (2004).
- Ghamlouche, I., Crainic, T. G. and Gendreau, M., “Path relinking, cycle-based neighbourhoods and capacitated multicommodity network design” *Annals of Operations Research*, **131**, 109-133. (2004)

- Glover, F., “Future paths for integer programming and links to artificial Intelligence”, *Computer and Operations Research*, **1**, 533. (1986).
- Glover, F., “A Template for Scatter Search and Path Relinking”, In J. Hao, E. Lutton, E. Ronald, M. Schoenauer, and D. Snyers (eds.), *Artificial Evolution*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. **1363**. Berlin: Springer, pp. 13–54. (1997),
- Glover, F., Laguna, M. and Martí, R., “Fundamentals of scatter search and path relinking”, *Control and Cybernetics* **39**(3), 653-684, (2000)
- Lin, B. and Miller, D. C. “Solving Heat Exchanger Network Synthesis Problems with Tabu Search”. *Computers and Chemical Engineering*, **28**, 1451. (2004a)
- Lin, B. and Miller, D. C., “Tabu Search Algorithm for Chemical Process Optimization”, *Computers and Chemical Engineering*, **28**, 2287, (2004b)
- Narasimhan, S.y C. Jordache, “Data Reconciliation and Gross Error Detection”. *Gulf Publishing Company*, Houston, USA. (2000).
- Teh, Y. and G. Rangaiah, “Tabu search for global optimization of continuous functions with application to phase equilibrium calculations”, *Computers and Chemical Engineering*, **28**, 1665, (2003)