



Revista Electrónica de
Tecnología, Educación y Ciencia
ISSN: 2953-5654
<http://retec.unsa.edu.ar>
Universidad Nacional de Salta

**Diseño óptimo de redes de sensores inteligentes en
procesos industriales: una estrategia híbrida de aprendizaje
probabilístico y búsqueda local orientada a confiabilidad y
valor de información**

**Mercedes Carnero², Carlos Carossio², Emilio Corti^{1 2}
Daniel Anunziata^{1 3}, José Luis Hernández^{1 2}**

¹ Laboratorio de Redes – ² Grupo de Optimización – ³ GCID (Grupo de Ciencia de Datos)
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto
{ mcarnero, ecorti, danunziata, JLH }@ing.unrc.edu.ar

**Revista Electrónica de Tecnología, Educación y Ciencia,
Volumen 1, Número 3, pág. 91-109, jun, 2026. ISSN: 2953-5654**

Disponible en <http://retec.unsa.edu.ar/>

Diseño óptimo de redes de sensores inteligentes en procesos industriales: una estrategia híbrida de aprendizaje probabilístico y búsqueda local orientada a confiabilidad y valor de información

Mercedes Carnero², Carlos Carossio², Emilio Corti^{1 2}
Daniel Anunziata^{1 3}, José Luis Hernández^{1 2}

¹ Laboratorio de Redes – ² Grupo de Optimización – ³ GCID (Grupo de Ciencia de Datos)
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto
{ mcarnero, ecorti, danunziata, JLH }@ing.unrc.edu.ar

Resumen: El diseño de redes de sensores es una decisión estratégica para la operación digital de procesos industriales, ya que define qué información estará disponible para monitoreo, reconciliación de datos, control avanzado, diagnóstico de fallas, mantenimiento predictivo y gemelos digitales. En escenarios industriales actuales, la selección de sensores no puede reducirse a una minimización del costo de adquisición: debe considerar confiabilidad, degradación, mantenimiento, restricciones de instalación, incertidumbre de modelos, costo de ciclo de vida y valor económico de la información. Este artículo presenta una metodología de diseño óptimo basada en una estrategia híbrida PBIL-SOTS. La propuesta combina aprendizaje probabilístico poblacional, útil para explorar configuraciones diversas, con búsqueda Tabú y oscilación estratégica, orientada a mejorar soluciones cercanas a la frontera de factibilidad. Se reformula la función de evaluación para integrar precisión, estimabilidad, confiabilidad sistémica, información aportada por la red y valor operativo de las mediciones. También se propone un protocolo de validación reproducible, con análisis estadístico, estudio de ablación, sensibilidad paramétrica y ejecución paralela. El enfoque resultante concibe a la red de sensores como infraestructura de información, no solo como equipamiento de instrumentación.

Abstract: Sensor network design is a strategic decision for digital industrial process operation because it determines which information will be available for monitoring, data reconciliation, advanced control, fault diagnosis, predictive maintenance, and digital twins. In current industrial scenarios, sensor selection cannot be reduced to an acquisition-cost minimization problem: it must account for reliability, degradation, maintenance, installation constraints, model uncertainty, life-cycle cost, and the economic value of information. This paper presents an optimal design methodology based on a hybrid PBIL-SOTS strategy. The proposal combines population-based probabilistic learning, which is useful for exploring diverse configurations, with Tabu Search and strategic oscillation, aimed at improving solutions close to the feasibility boundary. The evaluation function is reformulated to integrate precision, estimability, system-wide reliability, information contribution, and operational value of measurements. A reproducible validation protocol is also proposed, including statistical analysis, ablation study, parametric sensitivity, and parallel execution. The resulting approach understands the sensor network as an information infrastructure rather than only as instrumentation equipment.

Palabras claves: redes de sensores inteligentes; optimización combinatoria; PBIL-SOTS; búsqueda Tabú; valor de información; confiabilidad; reconciliación de datos; gemelos digitales; Industria 4.0.

1. Introduction

La digitalización industrial ha incrementado de manera significativa la dependencia de las organizaciones respecto de la calidad, disponibilidad y confiabilidad de sus datos. En plantas de proceso, sistemas energéticos, redes hidráulicas, industrias alimentarias, instalaciones químicas y entornos manufactureros complejos, las decisiones operativas se apoyan cada vez más en información capturada por sensores, transmitida por redes industriales, almacenada en plataformas digitales y procesada por modelos computacionales. En este contexto, un sistema de control avanzado, un tablero de monitoreo, un algoritmo de diagnóstico, una estrategia de mantenimiento predictivo o un gemelo digital solo pueden ser tan confiables como lo son las mediciones que los alimentan. Por ello, el diseño de la red de sensores dejó de ser un problema accesorio de instrumentación y pasó a constituir una decisión estructural de ingeniería.

Esta transformación se explica por el cambio de rol de la medición dentro de la planta. Tradicionalmente, un sensor podía ser visto como un dispositivo destinado a registrar una variable puntual: caudal, presión, temperatura, nivel, composición, potencia, velocidad o concentración. En una arquitectura industrial moderna, en cambio, cada medición forma parte de una infraestructura de información más amplia. Un sensor no solo entrega un dato local; también contribuye a estimar variables no medidas, reconciliar balances, detectar inconsistencias, anticipar fallas, validar modelos, ajustar controladores y reducir incertidumbre sobre el estado del proceso. Así, la pregunta ya no es solamente dónde instalar instrumentos, sino qué información necesita realmente la organización para operar mejor, con menor costo, mayor seguridad y mayor capacidad de respuesta.

En una planta de proceso no todas las variables pueden medirse. Algunas mediciones son técnicamente difíciles porque requieren condiciones especiales de instalación, protección, calibración o acceso físico. Otras son económicamente costosas, ya sea por el precio del instrumento, por la necesidad de acondicionamiento de señal, por el mantenimiento periódico o por la criticidad del punto de montaje. También existen mediciones que, aunque posibles, pueden resultar redundantes si el modelo del proceso permite estimarlas con suficiente precisión a partir de balances, relaciones físicas y mediciones indirectas. En sentido inverso, una medición aparentemente secundaria puede ser muy valiosa si mejora la observabilidad del sistema, reduce la incertidumbre de una variable crítica o permite detectar tempranamente una falla operativa.

La pregunta de diseño es entonces: ¿qué conjunto de sensores permite obtener la información necesaria con el menor costo total y con suficiente robustez operativa? Esta pregunta involucra varias dimensiones simultáneas. El costo de adquisición de los instrumentos es importante, pero no es el único criterio relevante. También deben considerarse el costo de mantenimiento, la confiabilidad del sensor, la degradación esperable de la medición, la frecuencia de calibración, la posibilidad de falla, la precisión requerida por los sistemas de control, la importancia económica de las variables estimadas y la capacidad de la red para seguir siendo útil ante perturbaciones o pérdida de instrumentos. En consecuencia, el diseño óptimo de una red de sensores debe entenderse como un problema de decisión multicriterio.

Desde el punto de vista matemático, la respuesta no es trivial. Cada sensor candidato puede representarse mediante una decisión binaria: instalarlo o no instalarlo. Si existen n variables candidatas, el espacio de búsqueda contiene 2^n configuraciones posibles. Este crecimiento exponencial hace que el problema se vuelva rápidamente difícil de resolver por enumeración directa. Además, la factibilidad de una configuración no depende solo del número de sensores instalados, sino de la estructura del modelo, de las variables críticas seleccionadas, de la precisión exigida, de las relaciones de redundancia, de las restricciones físicas de instalación y

de las fallas que la red debe tolerar. Dos redes con igual cantidad de sensores pueden tener desempeños completamente diferentes si una de ellas mide variables estructuralmente más informativas que la otra.

A esta dificultad combinatoria se suma una dificultad conceptual. Una red de sensores no debe evaluarse únicamente por su capacidad de cumplir restricciones nominales en condiciones ideales. En aplicaciones reales, los procesos operan con incertidumbre, ruido, perturbaciones, cambios de régimen, degradación de equipos y datos históricos incompletos. Por esa razón, una configuración óptima en términos estrictamente económicos puede resultar frágil desde el punto de vista operativo. Una red demasiado ajustada puede ser barata, pero perder capacidad de estimación ante la falla de un único instrumento. Una red excesivamente redundante puede ser robusta, pero injustificable desde el punto de vista económico. El desafío consiste en encontrar configuraciones que equilibren costo, precisión, estimabilidad, confiabilidad y valor de información.

Este artículo propone un enfoque metodológico para abordar ese problema desde una perspectiva actual de optimización combinatoria aplicada a procesos industriales. La estrategia combina un algoritmo de estimación de distribución, Population Based Incremental Learning (PBIL), con búsqueda Tabú y oscilación estratégica (SOTS). PBIL permite explorar el espacio de soluciones mediante aprendizaje probabilístico: a partir de configuraciones evaluadas, el algoritmo aprende qué sensores tienden a formar parte de buenas redes. SOTS, por su parte, permite mejorar localmente soluciones prometedoras mediante movimientos controlados de eliminación e incorporación de sensores, explorando especialmente la frontera entre factibilidad y no factibilidad, donde suelen encontrarse configuraciones de alto interés práctico.

La combinación de ambos enfoques resulta adecuada porque el diseño de redes de sensores exige simultáneamente exploración y explotación. La exploración es necesaria para recorrer regiones diversas del espacio de soluciones y evitar una convergencia prematura hacia configuraciones pobres. La explotación es necesaria para refinar redes candidatas, eliminar redundancias, recuperar factibilidad cuando se incumplen restricciones y ajustar el balance entre costo e información. En este sentido, PBIL aporta una memoria probabilística global, mientras que SOTS aporta una memoria local basada en trayectorias de búsqueda y movimientos prohibidos temporalmente. La interacción entre ambos mecanismos permite construir una estrategia flexible, escalable y naturalmente paralelizable.

La contribución principal del trabajo es ampliar esta arquitectura hacia criterios actuales de diseño de redes de sensores inteligentes. En particular, se propone pasar de una formulación centrada solo en costo, estimabilidad y precisión hacia una formulación más amplia que incorpore confiabilidad sistémica, valor económico de la información, medidas informacionales, costo de ciclo de vida, degradación de sensores, reproducibilidad experimental y paralelización efectiva. Esta ampliación es necesaria porque las plantas industriales actuales no solo requieren medir variables, sino sostener una infraestructura confiable de datos para monitoreo, diagnóstico, control, mantenimiento predictivo y gemelos digitales.

El artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se revisan los trabajos relacionados y la evolución del diseño de redes de sensores desde las formulaciones clásicas hacia enfoques más integrados. En la sección 3 se presenta la formulación del problema, incorporando variables binarias, restricciones de factibilidad y criterios ampliados de evaluación. En la sección 4 se describe la estrategia híbrida PBIL-SOTS propuesta. En la sección 5 se desarrollan los criterios de diseño incorporados: confiabilidad, valor de información, medidas informacionales y modelos dinámicos. En la sección 6 se vincula la red de sensores con una

arquitectura de operación digital. Finalmente, las secciones 7, 8 y 9 presentan el protocolo de validación, la discusión y las conclusiones del trabajo.

2. Trabajos relacionados

El diseño óptimo de redes de sensores en plantas de proceso ha sido abordado desde distintas perspectivas: programación matemática, teoría de grafos, algoritmos evolutivos, búsqueda local, metaheurísticas híbridas, algoritmos de estimación de distribución y, más recientemente, enfoques basados en confiabilidad, valor de información y optimización integrada con sistemas digitales de operación. Esta evolución refleja un cambio importante: la red de sensores ya no se evalúa únicamente por su costo de instalación, sino por su capacidad para sostener decisiones confiables durante la operación de la planta.

Los primeros enfoques se concentraron principalmente en la selección de sensores de mínimo costo sujetos a restricciones de estimabilidad, observabilidad o precisión. En ese contexto, el problema se formulaba habitualmente como una optimización combinatoria con variables binarias, donde cada variable indicaba la instalación o no de un instrumento. Estas formulaciones permitieron establecer una base rigurosa para el problema, pero tendían a trabajar bajo supuestos relativamente restrictivos: modelos estacionarios, errores de medición independientes, sensores homogéneos y criterios de evaluación centrados en el costo de adquisición.

Una línea relevante de trabajos utilizó programación matemática, en particular formulaciones MILP o MINLP, para seleccionar redes de sensores que cumplieran restricciones de precisión o diagnóstico. Estos métodos tienen la ventaja de proporcionar formulaciones claras y, en ciertos casos, garantías de optimalidad. Sin embargo, cuando el número de sensores candidatos crece, cuando se incorporan restricciones adicionales o cuando el modelo del proceso es no lineal, el problema puede volverse computacionalmente costoso. Esta dificultad motivó el uso de estrategias heurísticas y metaheurísticas capaces de encontrar buenas soluciones en tiempos razonables.

Dentro de las metaheurísticas, los algoritmos genéticos fueron una de las primeras alternativas ampliamente utilizadas para el diseño de redes de sensores. Su principal fortaleza es la capacidad de explorar grandes espacios de búsqueda sin requerir propiedades de convexidad ni derivabilidad. Sin embargo, su desempeño depende fuertemente del diseño de operadores de cruce, mutación, selección y reparación de soluciones. En problemas con restricciones fuertes de estimabilidad o precisión, muchas soluciones generadas aleatoriamente pueden resultar inviables, lo que obliga a introducir mecanismos específicos para guiar la búsqueda.

En esta misma dirección, Carnero et al (2013) propusieron una estrategia híbrida que combina PBIL y SOTS para resolver el diseño de redes de sensores como un problema combinatorio de gran escala. La idea central de ese enfoque es particularmente relevante para el presente trabajo: PBIL permite aprender probabilísticamente qué mediciones aparecen con mayor frecuencia en soluciones de buena calidad, mientras que SOTS permite mejorar localmente configuraciones cercanas a la frontera de factibilidad. Esta combinación equilibra exploración global y explotación local, dos capacidades necesarias en problemas con gran cantidad de variables binarias y múltiples restricciones.

Posteriormente, Carnero, et al (2018) profundizaron el uso de algoritmos de estimación de distribución para la localización óptima de sensores en plantas químicas. Estos enfoques resultan

atractivos porque reemplazan los operadores clásicos de los algoritmos genéticos por un modelo probabilístico que se actualiza a partir de las mejores soluciones. En términos prácticos, el algoritmo aprende qué sensores tienden a ser estructuralmente importantes para cumplir restricciones de estimabilidad y precisión. Esta característica es especialmente útil cuando se trabaja con redes de gran tamaño, donde la exploración puramente aleatoria se vuelve ineficiente.

La búsqueda Tabú también ha tenido un papel importante en este tipo de problemas. Su principal aporte es el uso de memoria para evitar ciclos y escapar de óptimos locales. La variante con oscilación estratégica resulta especialmente adecuada para el diseño de sensores porque muchas soluciones interesantes se ubican cerca de la frontera entre factibilidad y no factibilidad. Quitar un sensor puede reducir el costo, pero comprometer la precisión o la estimabilidad; agregarlo puede recuperar factibilidad, pero aumentar el costo total. Oscilar de manera controlada alrededor de esa frontera permite explorar configuraciones que un método estrictamente factible podría descartar demasiado pronto.

La literatura más reciente amplió el alcance del problema. En lugar de considerar solamente costo y precisión, comenzaron a incorporarse criterios de confiabilidad sistémica. Desde esta perspectiva, una red de sensores no debe ser adecuada solo en condiciones nominales, sino también frente a fallas de instrumentos, degradación de señales, pérdida de comunicación o atrasos de calibración. Prakash et al. (2020), por ejemplo, desarrollan formulaciones orientadas a evaluar la red de sensores según criterios de confiabilidad a nivel de sistema. Esta línea es importante porque aproxima el diseño al comportamiento real de una planta industrial, donde los instrumentos pueden fallar o deteriorarse.

Otra contribución reciente proviene del concepto de valor económico de la información. Una medición no tiene valor solamente por su precisión, sino por el impacto que genera sobre la operación. Un sensor puede ser costoso y, aun así, justificarse si permite reducir pérdidas, mejorar el control, evitar paradas, detectar fallas críticas o disminuir incertidumbre en variables de alto impacto económico. Mkwanzani et al. (2022) integran el diseño óptimo de sensores con control auto-optimizante, mostrando que las mediciones pueden evaluarse por su contribución a reducir pérdidas económicas bajo perturbaciones y errores de medición.

También se observa un creciente interés por el uso de medidas informacionales. Las restricciones clásicas de precisión suelen evaluar la calidad de estimación variable por variable. Sin embargo, una red de sensores puede analizarse también por su capacidad de reducir la incertidumbre global sobre el estado del proceso. En esta línea, medidas basadas en entropía, información mutua o criterios derivados de la teoría de la información permiten formular problemas de selección de sensores con una base más amplia que la simple desviación estándar de estimaciones individuales. Manoj y Jan (2024) proponen un enfoque de optimización convexa para diseñar redes de sensores utilizando medidas informacionales, lo que muestra la vigencia de esta perspectiva.

Otro avance importante se relaciona con los modelos dinámicos y los sistemas distribuidos espacialmente. Muchos procesos industriales no pueden representarse adecuadamente solo mediante balances estacionarios. Reactores tubulares, redes hidráulicas, procesos térmicos, sistemas energéticos y operaciones con transporte distribuido requieren estimar perfiles que evolucionan en el tiempo y en el espacio. Seth et al, (2024) abordan la ubicación óptima de sensores para la estimación de perfiles en sistemas de parámetros distribuidos, lo que extiende el problema hacia escenarios más cercanos a aplicaciones industriales complejas.

A partir de estos antecedentes, puede observarse una transición clara. El diseño clásico de redes de sensores se centraba en responder qué instrumentos instalar para cumplir restricciones mínimas de precisión y estimabilidad al menor costo posible. El diseño actual debe responder una pregunta más amplia: qué red de sensores aporta la información más útil, confiable y económicamente valiosa para operar una planta digitalizada. Esta transición justifica incorporar costo de ciclo de vida, confiabilidad, degradación, valor de información, incertidumbre, integración con modelos digitales y reproducibilidad experimental.

El presente trabajo se ubica en esa línea. Recupera la fortaleza de una estrategia híbrida PBIL-SOTS para resolver un problema combinatorio de gran escala, pero reformula el criterio de diseño desde una perspectiva más actual. La red de sensores se interpreta como infraestructura de información para monitoreo, reconciliación de datos, diagnóstico de fallas, control avanzado, mantenimiento predictivo y gemelos digitales. En consecuencia, la calidad de una solución no se mide solamente por su costo, sino por su capacidad de sostener decisiones industriales robustas, verificables y económicamente justificables.

3. Formulación del problema

Se considera un proceso industrial representado por un conjunto de relaciones físicas, balances de masa y energía, restricciones operativas y, cuando corresponde, modelos dinámicos o datos históricos de operación. De manera general, el estado del proceso puede describirse mediante un vector de variables:

$$\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$$

donde cada componente representa una variable potencialmente relevante para la operación: caudal, presión, temperatura, composición, nivel, potencia, concentración u otra magnitud de interés. El diseño de la red de sensores consiste en decidir cuáles de esas variables serán medidas directamente y cuáles deberán ser estimadas a partir del modelo, de mediciones indirectas o de procedimientos de reconciliación de datos.

Para representar esa decisión se define un vector binario:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$$

donde:

$$q_i = \{ \begin{array}{l} 1, \text{ si se instala un sensor para medir la variable } z_i \\ 0, \text{ si la variable } z_i \text{ no se mide directamente} \end{array} \}$$

$$q_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n$$

En su forma clásica, el problema se formula como la minimización del costo total de instrumentación, sujeto a restricciones de estimabilidad y precisión. Es decir, se busca instalar la menor cantidad posible de sensores, o la combinación de menor costo, garantizando que ciertas variables críticas puedan ser estimadas con una incertidumbre aceptable.

Una formulación básica puede expresarse como:

$$\min_{\mathbf{q}} C(\mathbf{q})$$

sujeto a:

$$E_j(\mathbf{q}) \geq 1, \quad j \in S_E$$

$$\hat{\sigma}_k(\mathbf{q}) \leq \hat{\sigma}_k^{max}, \quad k \in S_P,$$

$$q_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n$$

donde $C(\mathbf{q})$ representa el costo de la red seleccionada, $E_j(\mathbf{q})$ indica si la variable crítica j es estimable, S_E es el conjunto de variables que deben ser estimables, $\hat{\sigma}_k(\mathbf{q})$ es la desviación estándar estimada para la variable k , S_P es el conjunto de variables sujetas a restricciones de precisión y $\hat{\sigma}_k^{max}$ es el máximo error admisible para dicha variable.

Sin embargo, esta formulación resulta insuficiente para una planta industrial digitalizada. En condiciones reales, un sensor no se caracteriza solamente por su costo de adquisición. También posee costo de instalación, costo de mantenimiento, frecuencia de calibración, confiabilidad, riesgo de falla, degradación de la señal, incertidumbre de medición, restricciones físicas de montaje y aporte diferencial de información. Por lo tanto, la red seleccionada no debería ser solo barata y factible desde el punto de vista del modelo, sino también robusta, mantenible y valiosa para la toma de decisiones.

La formulación propuesta amplía el problema clásico incorporando criterios de operación digital. En lugar de evaluar una red únicamente por su costo inicial, se considera su desempeño como infraestructura de información. La calidad de una solución \mathbf{q} depende entonces de cuatro dimensiones principales:

- el costo de ciclo de vida de la red;
- el cumplimiento de requisitos de estimabilidad y precisión;
- la confiabilidad sistémica ante fallas o degradación;
- el valor de información aportado por las mediciones.

Para integrar estas dimensiones en una única función de evaluación se propone una función escalar ponderada:

$$\min_{\mathbf{q}} H(\mathbf{q})$$

con:

$$H(\mathbf{q}) = \alpha \bar{C}_{cv}(\mathbf{q}) + \beta \bar{P}_{est}(\mathbf{q}) + \gamma \bar{P}_{rel}(\mathbf{q}) - \delta \bar{V}_I(\mathbf{q})$$

donde $\bar{C}_{cv}(\mathbf{q})$ representa el costo de ciclo de vida normalizado, $\bar{P}_{est}(\mathbf{q})$ es una penalización normalizada por incumplimientos de estimabilidad y precisión, $\bar{P}_{rel}(\mathbf{q})$ penaliza la baja confiabilidad sistémica y $\bar{V}_I(\mathbf{q})$ representa el valor de información normalizado aportado por la red. Los coeficientes α , β , γ y δ permiten ajustar la importancia relativa de cada criterio según el contexto industrial.

El signo negativo asociado a $\bar{V}_I(\mathbf{q})$ indica que el valor de información es un beneficio: cuanto mayor es la información útil aportada por la red, menor debería ser el valor de la función objetivo. En cambio, los otros términos representan costos o penalizaciones que se busca reducir. Para evitar inconsistencias dimensionales, todos los componentes se normalizan antes de ser combinados.

El costo de ciclo de vida puede incluir tanto costos de inversión como costos operativos:

$$C_{cv}(\mathbf{q}) = C_{adq}(\mathbf{q}) + C_{inst}(\mathbf{q}) + C_{mant}(\mathbf{q}) + C_{cal}(\mathbf{q}) + C_{rep}(\mathbf{q})$$

donde C_{adq} es el costo de adquisición, C_{inst} el costo de instalación, C_{mant} el costo de mantenimiento, C_{cal} el costo de calibración y C_{rep} el costo esperado de reemplazo o reparación. Esta definición permite evitar diseños aparentemente económicos en la etapa inicial, pero costosos de sostener durante la operación.

La penalización por estimabilidad y precisión puede definirse como:

$$P_{\{est\}}(\mathbf{q}) = \sum_{\{j \in S_E\}} \max \{0, 1 - E_j(\mathbf{q})\} + \sum_{\{k \in S_P\}} \max \left\{0, \frac{\{\hat{\sigma}_k - \sigma_k^{max}\}}{\sigma_k^{max}}\right\}$$

El primer término penaliza variables críticas no estimables. El segundo término penaliza aquellas variables cuya incertidumbre supera el máximo permitido. De este modo, una red puede ser evaluada no solo como factible o no factible, sino también por el grado en que incumple las restricciones. Esta característica resulta útil para metaheurísticas, porque permite explorar soluciones cercanas a la frontera de factibilidad.

La confiabilidad sistémica de la red puede representarse mediante una función $R_{sys}(\mathbf{q})$, que mide la probabilidad de que la red mantenga su capacidad de estimación bajo fallas plausibles de sensores. En una formulación penalizada:

$$P_{rel}(\mathbf{q}) = \max\{0, R_{min} - R_{sys}(\mathbf{q})\}$$

donde R_{min} es el nivel mínimo de confiabilidad requerido. Esta expresión penaliza redes que son adecuadas en condiciones nominales, pero frágiles ante la pérdida o degradación de instrumentos.

Por último, el valor de información puede interpretarse como la reducción de incertidumbre o de pérdida económica que produce la red seleccionada. De manera general:

$$V(\mathbf{q}) = I(\mathbf{z}, \mathbf{y}(\mathbf{q}))$$

donde $I(\mathbf{z}, \mathbf{y}(\mathbf{q}))$ representa una medida de información entre el estado del proceso \mathbf{z} y el conjunto de mediciones $\mathbf{y}(\mathbf{q})$ producido por la red seleccionada. En aplicaciones prácticas, este término puede aproximarse mediante reducción de varianza, información mutua, entropía, mejora en la estimación de variables críticas o reducción esperada de pérdidas económicas.

La formulación completa puede expresarse como:

$$\min_{\mathbf{q}} H(\mathbf{q})$$

sujeto a:

$$q_i \in \{0,1\}. \quad i = 1, \dots, n$$

$$C_{cv}(\mathbf{q}) \leq B$$

$$\hat{\sigma}_k(\mathbf{q}) \geq 1, \quad j \in S_E$$

$$\hat{\sigma}_k(\mathbf{q}) \leq \sigma_k^{max} \quad k \in S_P$$

$$R_{sys}(\mathbf{q}) \geq R_{min}$$

donde B representa el presupuesto máximo disponible para el diseño o actualización de la red. Según el contexto, algunas de estas restricciones pueden tratarse como restricciones duras y otras como penalizaciones dentro de la función $H(\mathbf{q})$.

También es posible formular el problema como una optimización multiobjetivo:

$$\min_{\mathbf{q}} [\bar{C}_{cv}(\mathbf{q}), \bar{P}_{est}(\mathbf{q}), \bar{P}_{rel}(\mathbf{q}), -\bar{V}_l(\mathbf{q})]$$

En este caso, el resultado no es una única red óptima, sino un conjunto de soluciones no dominadas o frente de Pareto. Esta alternativa es especialmente útil cuando no existe una ponderación evidente entre costo, confiabilidad e información, o cuando el diseñador necesita comparar diferentes compromisos antes de seleccionar una configuración final.

La Tabla 1 resume la diferencia entre la formulación clásica y la formulación propuesta.

Dimensión	Enfoque clásico	Enfoque propuesto
Objetivo	Minimizar costo de instrumentación	Optimizar costo, información, confiabilidad y valor operativo
Restricciones	Estimabilidad y precisión nominal	Estimabilidad, precisión, instalación, mantenimiento, fallas y presupuesto
Modelo	Balances en estado estacionario	Balances, modelos dinámicos, datos históricos y gemelos digitales
Sensores	Homogéneos o con un candidato por variable	Heterogéneos, degradables y con distintos costos de ciclo de vida
Validación	Casos sintéticos o de referencia	Protocolos reproducibles, comparación estadística y cómputo paralelo

Tabla 1: De la formulación clásica a una nueva formulación del diseño de redes de sensores.

4. Estrategia híbrida PBIL-SOTS propuesta

La estrategia propuesta mantiene una estructura híbrida porque el problema exige simultáneamente exploración y explotación. La exploración permite recorrer regiones diversas del espacio de soluciones; la explotación permite mejorar configuraciones prometedoras mediante movimientos locales. PBIL cumple el primer rol y SOTS el segundo.

4.1. Aprendizaje probabilístico mediante PBIL

PBIL trabaja con un vector de probabilidades p . Cada componente p_i indica la probabilidad de seleccionar el sensor i en la próxima generación de soluciones. A partir de soluciones bien evaluadas, el vector se actualiza gradualmente. Si una medición aparece con frecuencia en redes de buena calidad, su probabilidad aumenta; si aparece en redes de mala calidad o redundantes, su probabilidad tiende a disminuir.

La ventaja de este mecanismo es su simplicidad y su paralelización natural. Varias subpoblaciones pueden evolucionar de manera independiente y compartir información cada cierto número de iteraciones. Para evitar convergencia prematura, la propuesta

actualrecomienda monitorear diversidad mediante distancia de Hamming, entropía del vector p y dispersión de soluciones factibles.

4.2. Búsqueda local con oscilación estratégica

SOTS utiliza memoria Tabú para evitar ciclos y una estrategia de oscilación que permite cruzar controladamente la frontera entre soluciones factibles y no factibles. Este comportamiento es relevante porque muchas redes interesantes se encuentran cerca de esa frontera: quitar un sensor puede reducir costos, pero también puede comprometer una restricción de precisión o estimabilidad; agregarlo puede recuperar factibilidad, pero aumentar costo.

La oscilación estratégica permite explorar esa región de compromiso. En una fase destructiva se eliminan mediciones para reducir costo o redundancia; en una fase constructiva se agregan mediciones para recuperar factibilidad, confiabilidad o valor de información. La memoria Tabú impide repetir movimientos recientes y favorece trayectorias más diversas.

4.3. Integración de subpoblaciones y cómputo paralelo

La implementación recomendada utiliza múltiples subpoblaciones, cada una con su vector de probabilidades y su conjunto de soluciones. Las subpoblaciones pueden ejecutarse en distintos núcleos, nodos o procesos. El intercambio de información se realiza mediante cruza de vectores de probabilidad, migración de soluciones élite o mezcla adaptativa según diversidad.

La frecuencia de aplicación de SOTS no debería ser fija en todos los contextos. Una regla adaptativa puede activar búsqueda local cuando una subpoblación muestra estancamiento, cuando la entropía del vector p cae por debajo de cierto umbral o cuando aparece una solución factible cercana a mejorar la mejor solución global.

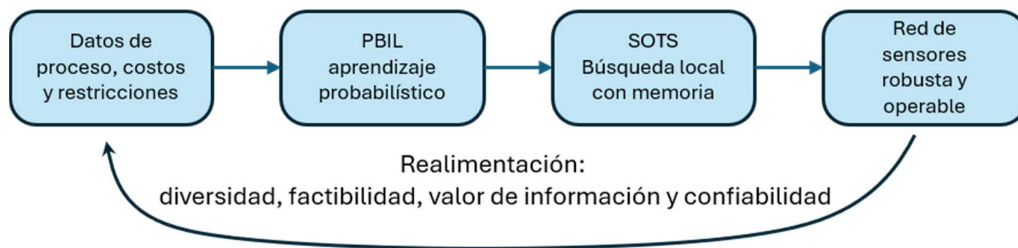


Figura 1: Flujo general de la estrategia híbrida PBIL-SOTS propuesta.

Tabla 2: Componentes del algoritmo y función dentro del diseño de redes de sensores.

Componente	Función	Aporte principal	Riesgo de diseño
PBIL	Exploración global	Aprende probabilidades de selección de sensores	Convergencia prematura si se pierde diversidad
SOTS	Explotación local	Mejora redes cercanas a la frontera de factibilidad	Alto costo computacional si se aplica indiscriminadamente
Subpoblaciones	Paralelización	Permiten búsqueda distribuida y diversidad estructural	Requieren sincronización y política de intercambio
Evaluación actual	Criterio multicriterio	Incluye costo, precisión, confiabilidad e información	Demanda calibrar pesos o resolver frente de Pareto

5. Criterios de diseño incorporados

La principal diferencia de la propuesta es que la calidad de una red de sensores no se mide solo por costo y precisión. Se evalúa como infraestructura de información para sostener decisiones. La Figura 2 resume los criterios integrados.

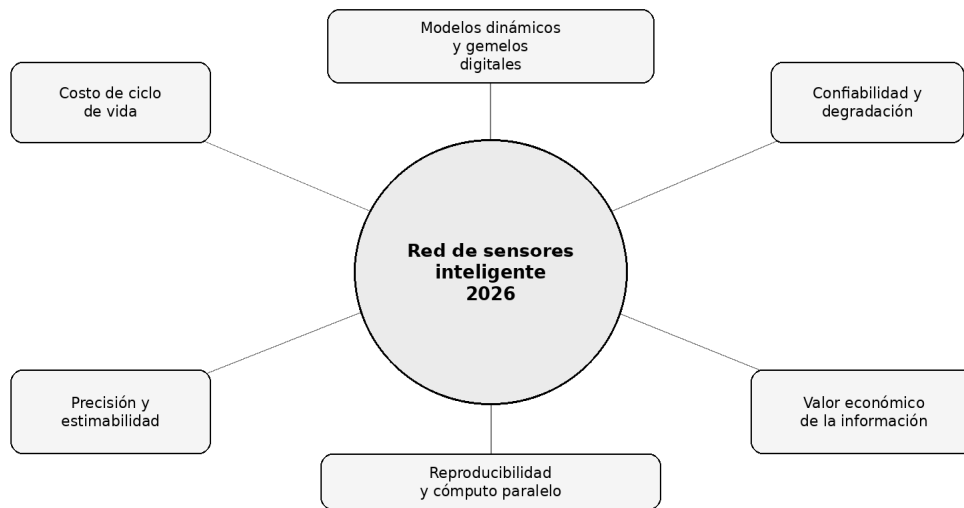


Figura 2: Criterios integrados para el diseño de redes de sensores inteligentes.

5.1. Confiabilidad y degradación

Una red factible en condiciones nominales puede volverse insuficiente cuando fallan instrumentos, se deteriora una señal o se retrasa la calibración. Por ello se incorpora una medida de confiabilidad sistémica: la red debe mantener capacidad de estimar variables críticas bajo fallas plausibles. Esta idea se vincula con los enfoques de confiabilidad sistémica desarrollados para sensor network design (Prakash et al., 2020).

5.2. Valor económico de la información

El valor de una medición depende del impacto que tiene sobre la operación. Un sensor caro puede justificarse si reduce pérdidas, permite un mejor control, evita paradas o mejora la precisión de variables críticas. La propuesta toma esta perspectiva y la integra con el concepto de control auto-optimizante, donde las mediciones se evalúan por su capacidad para reducir pérdida económica bajo perturbaciones (Mkwananzi et al., 2022).

5.3. Medidas de información

Las restricciones de precisión pueden complementarse con medidas de teoría de la información. En lugar de mirar solo desviaciones estándar individuales, puede evaluarse cuánto reduce una red la incertidumbre global del estado del proceso. En este sentido, medidas basadas en entropía y divergencias permiten formular problemas de selección de sensores con una base informacional más rica (Manoj y Jan, 2024).

5.4. Modelos dinámicos y perfiles espaciales

Muchos procesos actuales no pueden describirse adecuadamente mediante balances estacionarios. Reactores tubulares, redes hidráulicas, procesos térmicos distribuidos y sistemas energéticos requieren estimar perfiles que evolucionan en el espacio y en el tiempo. La ubicación de sensores para estimación de perfiles en sistemas de parámetros distribuidos es una extensión natural de la propuesta (Seth et al., 2024).

Tabla 3: Criterios de evaluación incorporados en la función $H_{\text{red}}(q)$.

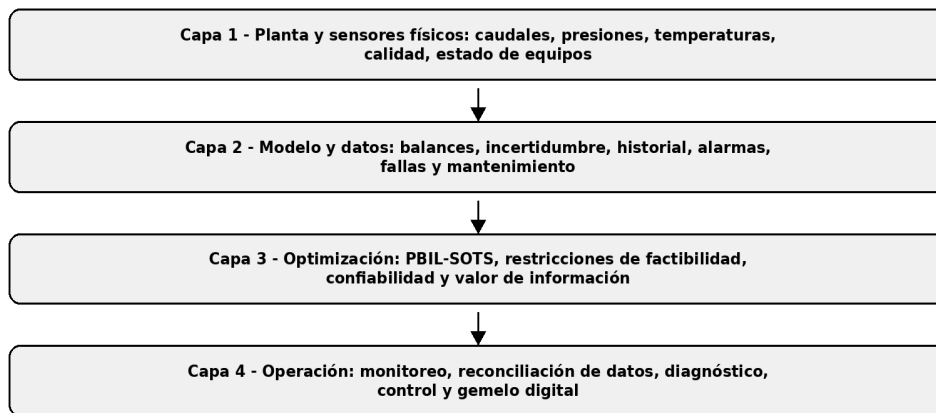
Criterio	Qué mide	Utilidad en la decisión
Costo de ciclo de vida	CAPEX, OPEX, calibración, mantenimiento y reemplazo	Evitar redes baratas de instalar pero caras de sostener
Estimabilidad	Capacidad de inferir variables no medidas desde modelo y mediciones	Garantizar información mínima sobre variables críticas
Precisión	Varianza o desviación estándar de estimaciones reconciliadas	Cumplir tolerancias operativas y de control
Confiabilidad	Probabilidad de mantener desempeño ante fallas o degradación	Diseñar redes robustas y mantenibles
Valor de información	Reducción de incertidumbre o pérdida económica	Priorizar mediciones con impacto operativo real

6. Arquitectura de decisión para operación digital

La red de sensores debe integrarse con los sistemas digitales de la planta. En una arquitectura industrial moderna, los sensores no constituyen una capa aislada de medición, sino el primer eslabón de una cadena de información que alimenta modelos de reconciliación de datos, sistemas de detección y diagnóstico de fallas, controladores avanzados, tableros de decisión, algoritmos de mantenimiento predictivo y gemelos digitales. Por esta razón, el diseño óptimo de la red no puede limitarse a decidir qué variables medir en forma directa; debe considerar cómo

esas mediciones serán utilizadas posteriormente para sostener decisiones operativas, tácticas y estratégicas.

Desde esta perspectiva, una red de sensores inteligente debe evaluarse por su capacidad para transformar datos físicos en información útil. La medición directa de una variable solo tiene valor si contribuye a mejorar la comprensión del estado del proceso, reducir incertidumbre, detectar desviaciones, anticipar fallas o mejorar la calidad de las decisiones. Así, el diseño de sensores se vincula con una arquitectura de decisión más amplia, en la que cada capa agrega valor sobre la anterior.



La red de sensores deja de verse como un gasto de instrumentación aislado y pasa a ser infraestructura de información para la decisión operativa.

Figura 3: Arquitectura de decisión para una red de sensores inteligente integrada a operación digital.

La primera capa corresponde a la planta física. En ella se generan las variables reales del proceso: caudales, presiones, temperaturas, niveles, composiciones, potencias, velocidades, estados de válvulas, consumos energéticos y condiciones de equipos. Los sensores instalados capturan una parte de ese estado físico y lo convierten en señales disponibles para los sistemas digitales. La calidad de esta capa depende de la ubicación de los instrumentos, su precisión, frecuencia de muestreo, calibración, confiabilidad, comunicación y mantenimiento.

La segunda capa corresponde a la gestión de datos y modelos. Las mediciones crudas rara vez son suficientes por sí mismas. Deben ser filtradas, validadas, contextualizadas y, en muchos casos, reconciliadas con modelos físicos del proceso. En esta capa se integran balances de masa y energía, restricciones operativas, datos históricos, alarmas, registros de mantenimiento y conocimiento del dominio. El objetivo es convertir señales individuales en una representación más coherente y confiable del estado de la planta. La reconciliación de datos cumple aquí un papel central, porque permite corregir inconsistencias, reducir el efecto del ruido de medición y estimar variables no medidas.

La tercera capa es la capa de optimización y decisión estructural. Allí se ubica la metodología propuesta en este trabajo. A partir de los modelos disponibles, los costos, las restricciones de instalación, los requerimientos de precisión, la confiabilidad esperada y el valor de información de cada medición, el algoritmo PBIL-SOTS evalúa configuraciones alternativas de red. Esta capa

permite decidir qué sensores instalar, qué sensores reemplazar, qué mediciones priorizar y qué redundancias conservar. También puede utilizarse para rediseñar una red existente cuando cambian las condiciones operativas, se incorporan nuevos activos o se actualizan los objetivos de control y monitoreo.

La cuarta capa corresponde a la operación digital. En esta etapa, la información generada por la red de sensores se transforma en acciones concretas. Los tableros de monitoreo permiten visualizar el estado del proceso; los algoritmos de diagnóstico detectan condiciones anómalas; los sistemas de control avanzado calculan acciones correctivas; los modelos predictivos anticipan fallas o degradación; y los gemelos digitales simulan escenarios alternativos antes de intervenir sobre la planta real. La calidad de todas estas decisiones depende directamente de la calidad de la red de sensores definida en las capas anteriores.

La integración entre capas es bidireccional. No solo las mediciones alimentan a los modelos y a los sistemas de decisión, sino que los resultados de esos sistemas también pueden retroalimentar el diseño de la red. Por ejemplo, si un algoritmo de diagnóstico muestra baja sensibilidad frente a una falla crítica, puede requerirse incorporar una nueva medición. Si un gemelo digital presenta alta incertidumbre en determinada zona del proceso, puede justificarse un sensor adicional. Si el historial de mantenimiento evidencia degradación frecuente de ciertos instrumentos, el diseño puede incorporar redundancia o sensores alternativos. De este modo, la red de sensores deja de ser una infraestructura estática y pasa a concebirse como un componente evolutivo de la operación digital.

En este marco, el valor de una medición no se define únicamente por su precisión instrumental. Una medición puede ser valiosa porque mejora la estimabilidad de una variable no medida, porque aumenta la robustez de la red ante fallas, porque permite detectar tempranamente una condición anómala o porque reduce la incertidumbre de un modelo predictivo. Por el contrario, una medición precisa y costosa puede tener bajo valor si aporta información redundante o si no mejora ninguna decisión relevante. Esta observación justifica incorporar criterios de valor de información y confiabilidad dentro de la función de evaluación propuesta.

La arquitectura planteada también permite diferenciar decisiones de corto, mediano y largo plazo. En el corto plazo, la red de sensores sostiene el monitoreo, la supervisión y la detección de fallas. En el mediano plazo, permite mejorar estrategias de control, mantenimiento y planificación operativa. En el largo plazo, aporta información para rediseñar procesos, evaluar inversiones, actualizar modelos digitales y mejorar la confiabilidad global de la planta. Por lo tanto, el diseño de la red debe contemplar no solo el funcionamiento inmediato, sino también su capacidad de sostener aprendizaje organizacional y mejora continua.

Finalmente, esta arquitectura refuerza la necesidad de diseñar redes reproducibles, auditables y mantenibles. En entornos industriales digitalizados, no basta con obtener una configuración óptima mediante un algoritmo; también es necesario justificar por qué esa red fue seleccionada, qué criterios se priorizaron, qué restricciones se cumplieron y qué compromisos se aceptaron entre costo, precisión, confiabilidad e información. La metodología PBIL-SOTS propuesta puede integrarse a esta arquitectura como una herramienta de apoyo a la decisión, capaz de generar alternativas, comparar configuraciones y documentar el proceso de selección de sensores.

En síntesis, la red de sensores debe entenderse como una infraestructura de información para la operación digital. Su diseño óptimo no termina en la instalación de instrumentos, sino que comienza allí: las mediciones capturadas por la planta alimentan modelos, los modelos alimentan

decisiones y las decisiones retroalimentan nuevas necesidades de medición. Esta visión sistémica permite alinear el diseño de sensores con los objetivos actuales de la industria: mayor confiabilidad, mejor uso de los datos, menor incertidumbre operativa y mayor capacidad de respuesta frente a escenarios cambiantes.

7. Protocolo de validación propuesto

Para que el enfoque sea reproducible se propone un protocolo de validación con cuatro bloques: definición de casos, comparación algorítmica, análisis estadístico y análisis de sensibilidad.

Bloque	Descripción	Salida esperada
Casos de prueba	Redes benchmark, modelos de proceso abiertos y escenarios industriales reproducibles	Matriz de balances, costos, desviaciones, restricciones y fallas
Métodos comparados	PBIL, SOTS, GA, MILP/MINLP cuando sea posible, heurísticas multiobjetivo	Costo, factibilidad, tiempo y calidad de solución
Repeticiones	Múltiples semillas aleatorias por caso	Mediana, IQR, mejor valor, dispersión y tasa de factibilidad
Ablation study	PBIL solo, SOTS solo, PBIL-SOTS sin diversidad, PBIL-SOTS completo	Contribución real de cada componente
Sensibilidad	Pesos de función objetivo, tasa de aprendizaje, frecuencia de SOTS, tamaño de subpoblaciones	Robustez frente a parametrización
Reproducibilidad	Repositorio con código, datos, semillas y ambiente de ejecución	Resultados verificables por terceros

Tabla 4: Protocolo experimental recomendado para evaluar PBIL-SOTS.

El protocolo permite distinguir tres tipos de contribuciones: mejora de calidad de solución, reducción de tiempo por paralelización y robustez frente a incertidumbre. También evita una debilidad frecuente de las metaheurísticas: depender de ejemplos aislados sin suficiente análisis estadístico.

8. Discusión

El enfoque propuesto es especialmente útil cuando las formulaciones exactas se vuelven difíciles de resolver por el tamaño del problema, la presencia de objetivos múltiples o la inclusión de restricciones de confiabilidad, mantenimiento y valor de información. En esos casos, el diseño de redes de sensores deja de ser una simple selección de instrumentos de bajo costo y se convierte en una decisión combinatoria compleja, donde cada sensor modifica simultáneamente la estimabilidad, la precisión, la robustez y la utilidad operativa de la red. PBIL aporta una representación compacta del conocimiento acumulado durante la búsqueda, ya que resume en un vector de probabilidades qué sensores tienden a formar parte de buenas soluciones. SOTS, por su parte, permite refinar esas soluciones y explorar la frontera de factibilidad, donde suelen encontrarse configuraciones de alto interés práctico.

La principal fortaleza de la estrategia es su flexibilidad. Puede trabajar con restricciones duras, penalizaciones, criterios económicos e indicadores de información dentro de una misma función de evaluación. Esto permite adaptar el modelo a distintos contextos industriales: plantas donde predomina el costo de instrumentación, instalaciones críticas donde la confiabilidad es prioritaria o sistemas digitalizados donde interesa maximizar el valor de la información disponible para control, diagnóstico o gemelos digitales. Además, su estructura por subpoblaciones la vuelve naturalmente paralelizable. Cada subpoblación puede explorar una región distinta del espacio de soluciones y compartir información de manera periódica, lo que permite pensar en implementaciones multicore, distribuidas o incluso aceleradas por GPU cuando el costo de evaluación de soluciones sea alto.

Otro aspecto relevante es que la estrategia permite trabajar con soluciones cercanas a la factibilidad, no solo con soluciones estrictamente factibles. Esto es importante porque, en problemas reales, pequeñas modificaciones en la red pueden producir grandes cambios en el costo o en la calidad de estimación. La oscilación estratégica facilita analizar esos compromisos: una fase puede eliminar sensores para reducir costo o redundancia, mientras otra puede reincorporarlos para recuperar precisión, estimabilidad o confiabilidad. Este comportamiento es adecuado para problemas en los que el diseñador necesita comprender no solo cuál red es mejor, sino también por qué ciertas mediciones resultan críticas.

También existen límites. PBIL univariado supone independencia entre variables y puede no capturar adecuadamente acoplamientos físicos fuertes entre mediciones. Por esa razón, una extensión relevante consiste en utilizar modelos probabilísticos que representen dependencias: factorizaciones marginales, redes bayesianas o distribuciones aprendidas con técnicas modernas de machine learning. Otro límite es la calibración de pesos en la función $H(\mathbf{q})$. En aplicaciones reales, puede ser difícil asignar de antemano la importancia relativa entre costo, confiabilidad e información. Por ello, una alternativa recomendable es resolver el problema como multiobjetivo y presentar un frente de Pareto que permita comparar explícitamente los compromisos entre redes más económicas, más robustas o más informativas.

9. Conclusiones

Se presentó una metodología para el diseño óptimo de redes de sensores inteligentes en procesos industriales. La propuesta combina PBIL y SOTS en una arquitectura híbrida que permite aprender patrones globales de buenas soluciones y mejorar localmente redes cercanas a la frontera de factibilidad. Esta combinación resulta adecuada para un problema de naturaleza combinatoria, en el que el número de configuraciones posibles crece exponencialmente con la cantidad de sensores candidatos y donde la factibilidad depende de restricciones de estimabilidad, precisión, confiabilidad y valor operativo.

La contribución central del trabajo es desplazar el problema desde la minimización aislada del costo de instrumentación hacia una decisión de información operacional. En la formulación propuesta, una red de sensores no se evalúa únicamente por cuántos instrumentos instala o por cuánto cuesta adquirirlos, sino por su capacidad para sostener decisiones industriales confiables. Por ello, se incorporan criterios como costo de ciclo de vida, precisión, estimabilidad, confiabilidad sistémica, degradación, valor de información y capacidad de integración con sistemas digitales de operación.

Este cambio de perspectiva es relevante para el contexto industrial actual. En una planta digitalizada, las mediciones no son elementos aislados, sino entradas críticas para sistemas de

monitoreo, reconciliación de datos, diagnóstico de fallas, control avanzado, mantenimiento predictivo y gemelos digitales. Una red de sensores adecuada debe aportar información suficiente, robusta y económicamente justificable para alimentar esa arquitectura. En consecuencia, el diseño óptimo de sensores debe considerarse parte de la infraestructura de datos de la planta y no solo como una decisión de instrumentación.

La estrategia PBIL-SOTS propuesta ofrece una base flexible para abordar este tipo de problemas. PBIL permite explorar el espacio de soluciones mediante aprendizaje probabilístico, identificando sensores que aparecen con frecuencia en configuraciones de buena calidad. SOTS complementa ese comportamiento mediante búsqueda local con memoria, capaz de mejorar soluciones y explorar regiones próximas a la frontera entre factibilidad y no factibilidad. Esta interacción permite equilibrar exploración global y refinamiento local, dos capacidades esenciales en problemas de gran escala.

El enfoque también resulta compatible con implementaciones paralelas. La estructura por subpoblaciones permite distribuir la búsqueda en distintos núcleos, procesos o nodos de cómputo, reduciendo tiempos de ejecución y favoreciendo la diversidad de soluciones. Esta característica es especialmente importante cuando la evaluación de cada red requiere simulaciones, reconciliación de datos, análisis de fallas o cálculo de medidas informacionales.

Como líneas futuras se propone, en primer lugar, implementar el algoritmo en paralelo real y evaluar su escalabilidad en casos de mayor dimensión. En segundo lugar, resulta conveniente incorporar modelos probabilísticos que representen dependencias entre variables, superando la hipótesis de independencia propia de PBIL univariado. En tercer lugar, se plantea resolver versiones multiobjetivo del problema, de modo de obtener frentes de Pareto entre costo, confiabilidad, precisión y valor de información. Finalmente, se propone validar la metodología con datos industriales, modelos dinámicos y casos benchmark abiertos, de manera que los resultados sean reproducibles y comparables por otros investigadores.

En síntesis, el trabajo propone una arquitectura de decisión para diseñar redes de sensores más robustas, informativas y sostenibles. Su aporte principal no está solo en la combinación algorítmica PBIL-SOTS, sino en la reformulación del problema: seleccionar sensores no simplemente para medir más barato, sino para construir una infraestructura confiable de información al servicio de la operación digital de procesos industriales.

Referencias

1. Bagajewicz, M. (1997). Design and retrofit of sensor networks in process plants. *AIChE Journal*, 43, 2300-2306.
2. Baluja, S. (1994). Population-based incremental learning: A method for integrating genetic search based function optimization and competitive learning. Technical Report CMU-CS-94-163, Carnegie Mellon University.
3. Carnero, M., Hernández, J. L. y Sánchez, M. (2013). A new metaheuristic based approach for the design of sensor networks. *Computers & Chemical Engineering*, 55, 83-96. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.04.007>
4. Carnero, M., Hernández, J. L. y Sánchez, M. (2018). Optimal Sensor Location in Chemical Plants Using the Estimation of Distribution Algorithms. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(36), 12149-12164. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b01680>
5. Glover, F. y Laguna, M. (1997). *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers.
6. Hauschild, M. y Pelikan, M. (2011). An introduction and survey of estimation of distribution algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(3), 111-128. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.08.003>

7. M A, Magbool Jan N. Convex optimization approach to design sensor networks using information theoretic measures. *AIChE J.* 2024;70(2):e18267. doi:10.1002/aic.18267
8. Mkwanzani, T., Louw, T. M., Auret, L., Mandegari, M. y Görgens, J. F. (2022). Combined optimal sensor network design and self-optimizing control with application in a typical sugarcane mill. *Journal of Process Control*, 114, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2022.04.006>
9. Prakash, O., Bhushan, M., Narasimhan, S. y Rengaswamy, R. (2020). Sensor network design based on system-wide reliability criteria. Part II: Formulations and applications. *Journal of Process Control*, 93, 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2020.07.004>
10. Seth, G., Bhushan, M. y Patwardhan, S. C. (2024). Optimal Sensor Placement Design for Profile Estimation of Distributed Parameter Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(9), 4046-4067. <https://doi.o>