



CIENCIAS TÉCNICAS

Premio Anual Academia de Ciencias de Cuba, 2020

Nuevos paradigmas en el diagnóstico de fallos en sistemas industriales

Orestes Llanes Santiago ^{1,2,*} <https://orcid.org/0000-0002-6864-9629>
Antonio J. Silva Neto ³ <https://orcid.org/0000-0002-9616-6093> Marcos
Quiñones Grueiro ⁴ <https://orcid.org/0000-0001-5391-6774> Alberto
Prieto Moreno ¹ <https://orcid.org/0000-0001-9907-885X> Adrián
Rodríguez Ramos ¹ <https://orcid.org/0000-0002-0240-7491> José
Manuel Bernal de Lázaro ¹ <https://orcid.org/0000-0002-2797-0205>
Cristina Verde Rodarte ⁵ <https://orcid.org/0000-0001-8700-516X>
Lídice Camps Echevarría ¹ <https://orcid.org/0000-0002-8021-8389>
José Luis Verdegay Galdeano ⁶ <https://orcid.org/0000-0003-2487-942X>
Carlos Cruz Corona ⁶ <https://orcid.org/0000-0003-2072-4949>
Maibeth Sánchez Rivero ¹ <https://orcid.org/0000-0002-3171-3148>
Diego Campos Knupp ³ <https://orcid.org/0000-0001-9534-5623>
Pedro Rivera Torres ⁷ <https://orcid.org/0000-0003-3507-1821>
Haroldo Fraga Campos Velho ⁸ <https://orcid.org/0000-0003-4968-5330>

¹ Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba

² Titular de la Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, Cuba

³ Universidad del Estado de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil

⁴ Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba

⁵ Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad México, México

⁶ Universidad de Granada (UGR), Granada, España

⁷ Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico

⁸ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. San Carlos, Brasil

*Autor para la correspondencia: orestes@tesla.cujae.edu.cu, oresteslls@gmail.com

RESUMEN

Palabras clave

Diagnóstico de fallos; procesos químicos; sistemas electromecánicos; redes de distribución de agua; manejo de datos; agrupamiento

Introducción. Para lograr elevados niveles de producción con calidad y con una utilización eficiente de la materia prima, las industrias deben tener instalados sistemas de diagnóstico de fallos procesando la información obtenida por los sistemas de adquisición de datos y control. El funcionamiento de estos sistemas se ve afectado por el ruido, la pérdida de información en los canales de comunicación, la presencia de fallos no conocidos para el sistema de diagnóstico y en el caso de los sistemas de múltiples modos de operación, por los fallos que se producen en las transiciones entre modos estacionarios ya que los métodos de diagnóstico desarrollados para estos modos donde las variables mantienen valores estacionarios no son satisfactorios para la transición. **Métodos.** En el presente trabajo se presentan un grupo de nuevos paradigmas con propuestas de soluciones a estas problemáticas utilizando



de manera efectiva herramientas de agrupamiento, algoritmos híbridos, métodos Kernel, manejo de datos, imputación y otras provenientes de la inteligencia computacional. Las propuestas realizadas son validadas con problemas de pruebas que son casos de estudio establecidos en la literatura científica que representan procesos químicos, sistemas electromecánicos y redes urbanas de distribución de agua. **Resultados.** Muestran la efectividad de las mismas y la posibilidad de que puedan aplicarse a procesos de diferentes tipos muy importantes para nuestro país en sus perspectivas de desarrollo, ahorro y cuidado del medio ambiente.

New paradigms in fault diagnosis in industrial systems

ABSTRACT

Keywords

Fault diagnosis; chemical process; electromechanical systems; water distribution networks; data driven; clustering

Introduction. To achieve high levels of quality production with efficient use of raw materials, industries must have fault diagnosis systems for processing and analyzing the information obtained through data acquisition and control systems. The performance of fault diagnosis systems is affected by noise, information loss in the data acquisition process, the presence of unknown faults, and in the case of multi-mode processes, the occurrence of faults during transitions between stationary modes. The latter problem derives from the fact that diagnostic methods developed for stationary modes cannot be applied satisfactorily during transitions. **Methods.** In the present paper, a group of new paradigms is presented to provide solutions to the above-mentioned problems through the effective use of data-driven methods, clustering, imputation, hybrid algorithms, and computational intelligence tools. The proposals are validated in benchmark problems established as study cases in the scientific literature representing chemical processes, electromechanical systems, and urban water distribution networks. **Results.** Besides demonstrating the effectiveness of the proposals, the set of benchmark processes considered is very important for our country in its prospects for development, saving and caring of the environment.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas industriales actuales hay una marcada necesidad de mejorar la eficiencia de los procesos para lograr aumentar la producción y lograr productos de mayor calidad que satisfagan los estándares nacionales e internacionales a la vez que se satisfacen las regulaciones medioambientales y de la seguridad industrial. Los fallos en las industrias producen un impacto no favorable para satisfacer esos objetivos. Lo anterior indica la necesidad de desarrollar sistemas de diagnóstico de fallos también conocidos como sistemas de monitoreo de condición en los procesos industriales que logren detectar y localizar los fallos que se presenten en el menor tiempo posible y con un elevado desempeño. Para lograr esto, los sistemas de diagnóstico que se desarrollen deben resolver los inconvenientes que provocan el ruido en las mediciones, la pérdida de información producto de errores en los sistemas de transmisión de la información, la complejidad computacional que surge en las grandes industrias cuando el número de variables que se miden en cada instante de muestreo es muy grande, identificar nuevos patrones que pudieran

ser representativos de fallos no conocidos y detectar fallos en los procesos de transición en los sistemas con múltiples modos de operación entre otras dificultades. Además de lo anterior, es necesario que las soluciones desarrolladas sean generalizables a la gran diversidad existente entre los procesos industriales donde se distinguen procesos químicos, sistemas eléctricos, mecánicos y electromecánicos, sistemas de distribución de agua, y sistemas de manufactura que se caracterizan por su amplia presencia en el moderno mundo industrial.

En este trabajo se presentan un grupo de nuevos paradigmas dentro del diagnóstico de fallos en sistemas industriales que pretenden dar solución a varias de las problemáticas anteriores utilizando de manera efectiva técnicas de agrupamiento (*clustering*), de manejo de datos (*data driven*), imputación, y herramientas computacionales provenientes del amplio mundo de lo que se conoce hoy como inteligencia computacional. Específicamente se presentan nuevas propuestas de agrupamiento y clasificación de observaciones, así como el desarrollo de algoritmos híbridos que permiten

mejorar significativamente el desempeño de los sistemas de diagnóstico, identificar en línea nuevos patrones que pueden representar nuevos fallos, nuevos procedimientos de imputación de datos faltantes en las observaciones obtenidas por los sistemas SCADAS que favorecen mantener elevados niveles de desempeño en los sistemas diagnóstico y nuevos indicadores para medir de manera más efectiva el desempeño de los clasificadores. Además, se presentan procedimientos de agrupamiento de nodos en las redes de distribución de agua para crear áreas que faciliten la detección y localización de fugas de agua, de división de grandes procesos en subprocesos a los que se pueden aplicar distintas herramientas buscando las de mejores resultados en cada subproceso y se proponen nuevas soluciones para la detección de fallos en la fase de transición en los sistemas con múltiples modos de operación. Las propuestas que en esos resultados se presentan son aplicadas a problemas de pruebas establecidos en la literatura científica internacional y que se insertan en tres grandes grupos: procesos químicos, sistemas electromecánicos y redes urbanas de distribución de agua los cuales son muy importantes para nuestro país en sus perspectivas de desarrollo, ahorro y cuidado del medio ambiente.

MÉTODOS

Agrupamiento, estrategias híbridas y métodos Kernel

El ruido en los sistemas industriales es uno de los factores que más afecta para lograr buenos desempeños en los sistemas de diagnóstico de fallos. Otro elemento a tener en cuenta es el solapamiento entre los patrones que representan el funcionamiento normal del proceso y los que caracterizan al proceso ante la presencia de diferentes fallos en sensores, actuadores y en el propio proceso. Para resolver estas dificultades se proponen metodologías que combinan diferentes algoritmos y métodos Kernel para mejorar el desempeño de los sistemas de diagnóstico.

En una primera propuesta se utiliza la idea con la que se desarrolló el algoritmo *noise clustering* (NC) que logra agrupar las observaciones que son clasificadas como ruido y se modificó el algoritmo *fuzzy c-means*. De esta manera se logra crear con las observaciones del proceso $c+1$ clases donde las c clases representan al estado funcionamiento normal y los estados que representan a los diferentes fallos que se desean diagnosticar en el proceso. La clase restante es la que contiene las observaciones clasificadas como observaciones fuera de rango. Un algoritmo alternativo en el primer paso de la metodología es el uso del algoritmo *density oriented fuzzy C-means* (DOFCM) que tiene como objetivo disminuir la sen-

sibilidad al ruido en el proceso de agrupamiento difuso y al igual que el algoritmo NC crea $c+1$ clases siendo una la del ruido. Posteriormente, en un segundo paso, los datos agrupados en las c -clases es procesado por el algoritmo *Kernel fuzzy C-means* que al proyectar los datos a un espacio de dimensión superior logra mejoras significativas en el proceso de clasificación. En un tercer paso se puede optimizar los parámetros de los algoritmos anteriormente mencionados utilizando metaheurísticas que permitirán mejorar los resultados anteriores. ^(1,2,3,4,5)

En la figura 1 se presenta esta propuesta de metodología. En la figura 2 se presenta gráficamente el procesamiento que se hace de los datos en esta propuesta.

En la propuesta anterior las observaciones que son clasificadas como ruido son desechadas y sin embargo esas observaciones pueden ser representativas de un nuevo fallo para el cual el clasificador no estaba entrenado. Es por esta razón que en una segunda propuesta las observaciones agrupadas en la clase que representa al ruido son procesadas por un algoritmo que analiza la densidad del grupo para determinar si esa clase es representativa de un nuevo patrón lo cual es indicado por un valor elevado de esa densidad. En ese caso los expertos deben identificar el nuevo fallo que es representado por ese patrón e incorporar ese patrón a la base de datos del proceso que contiene el patrón que representa el estado de funcionamiento normal y el patrón que representa a cada fallo. ^(6,7,8)

Una tercera propuesta, pero dirigida en esta ocasión a disminuir la complejidad computacional y utilizar las ventajas de combinar herramientas de clasificación es la estrategia de agrupamiento que se proponen O. Llanes Santiago *et al.* ⁽⁹⁾ donde se logran elevados niveles de desempeños a partir de dividir el proceso en subprocesos para el análisis.

Una última propuesta que se realiza en esta investigación es la extensión de las técnicas de agrupamiento a las redes de distribución de agua. Ahora el agrupamiento no se realiza a partir de observaciones pertenecientes a un patrón de comportamiento sino a nodos de la red que de acuerdo a su distribución topológica forman una zona. En este caso, el método de agrupamiento permite formar zonas de análisis que ayudan a simplificar la labor de detección y localización de la fuga significativamente tal y como se muestra en. ^(10,11)

Monitoreo de condición basado en modelo

Cuando los procesos no son de elevada complejidad se pueden desarrollar modelos matemáticos que representan el funcionamiento de los mismos. En una primera propuesta se desarrollan modelos donde los fallos son representados por parámetros del mismo. Cuando la salida del proceso y el

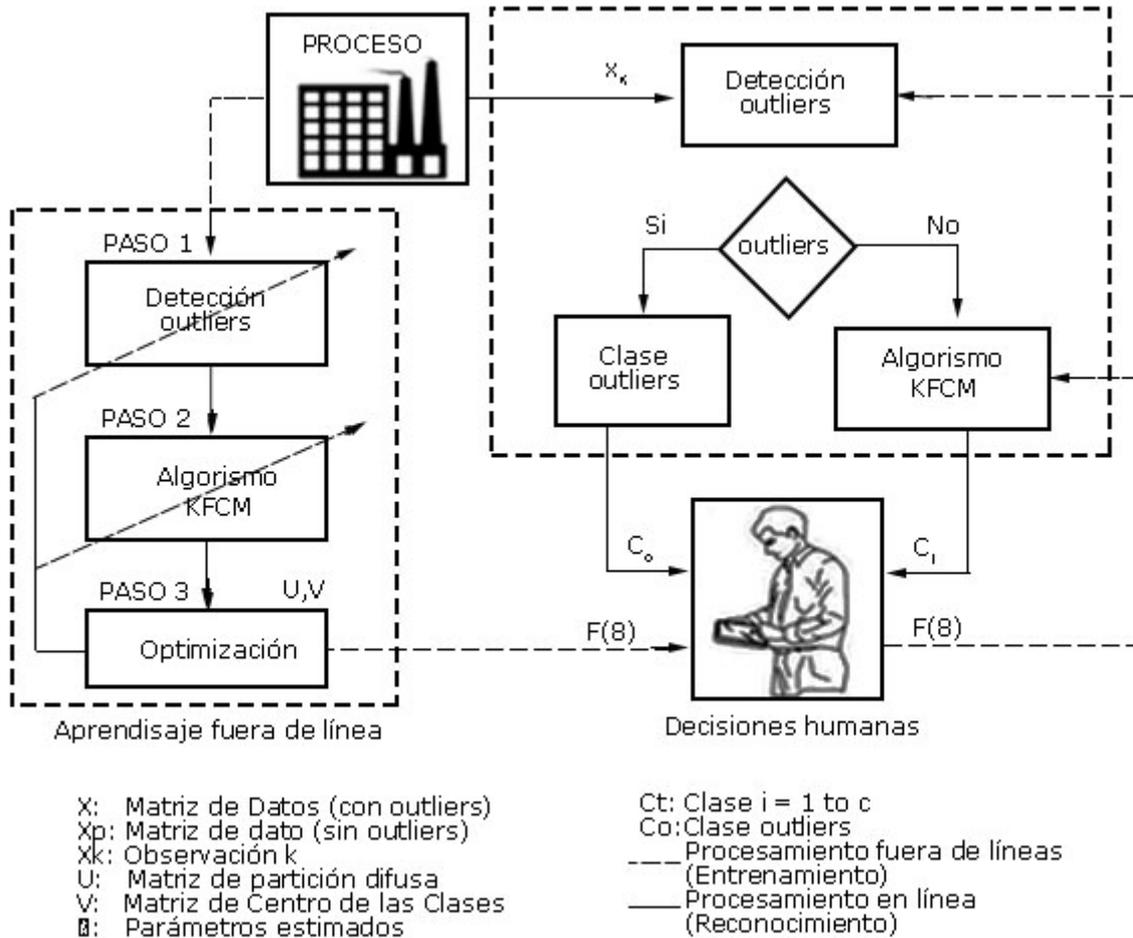


Fig. 1. Esquema del sistema de diagnóstico de fallos con agrupamiento y métodos kernel. ⁽⁴⁾

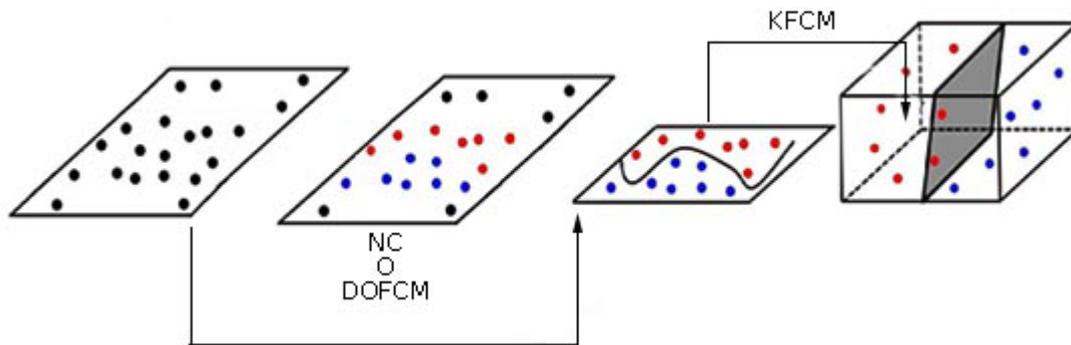


Fig. 2. Ejemplo del procesamiento de datos de la según A. Rodríguez Ramos *et al.* ⁽²⁾

modelo difieran para un mismo valor de la entrada eso indica la presencia de un fallo. Entonces mediante un proceso de optimización en el cual se utilizan algoritmos de inteligencia computacional se van estimando esos parámetros que representan los diferentes fallos y estableciéndose restricciones para la toma de valores de acuerdo a la realidad física. Cuando se logra que la salida del proceso y el modelo coincidan, los valores de los parámetros estimados indican dónde está

el fallo y cuál es su magnitud. La propuesta fue aplicada a procesos químicos y sistemas eléctricos y electromecánicos. Esta misma estrategia de estimación de parámetros fue usada para la estimación de parámetros cinéticos en modelos de cromatografía.

Para el caso de la aplicación de esta metodología en las redes de distribución de agua donde se aplicó una variante de algoritmo de evolución diferencial en la localización de la

fuga que considera la configuración topológica de la red en la modificación del espacio de búsqueda. ^(12,13,14,15,16)

Con el objetivo de mejorar los resultados anteriores en la localización de fugas de redes de distribución de agua, se creó una metodología donde en un primer paso se utilizó una red neuronal de aprendizaje profundo para detectar la presencia de una fuga. Una vez que la fuga es detectada con un proceso de regresión utilizando un proceso gaussiano el rango de dimensión de la fuga es estimado lo cual ayuda al algoritmo de evolución diferencial modificado mencionado anteriormente en el proceso de localización al cual se le incorporó también un análisis temporal todo lo cual redundó en la mejora significativa de la detección y localización de las fugas. La figura 3 muestra esta propuesta de metodología. ⁽¹⁷⁾

Finalmente, fue aplicada una estrategia basada en el modelo para detectar fallos múltiples en redes de manufactura y fallos de dispositivos en redes inteligentes, pero en este caso se emplearon con éxito las redes booleanas probabilísticas. ^(18,19)

Diagnóstico de fallos con herramientas de manejo de datos, imputación y para sistemas multimodos

Cuando los procesos son de elevada complejidad y la construcción de un modelo basado en los primeros principios

se dificulta, los sistemas de diagnóstico se desarrollan con herramientas que permiten el análisis de los datos obtenidos por los sistemas de control y adquisición de datos (SCADA). Las propuestas expresadas en la subsección “Agrupamiento, estrategias híbridas y métodos Kernel” pueden ser ubicadas también en este grupo, pero se decidió tratarlas aparte por el tipo de herramientas utilizadas basadas fundamentalmente en el agrupamiento.

Un problema muy común en los sistemas de SCADA es la pérdida de información de una o varias variables en una observación por ruido o problemas en el canal de transmisión de la información. Esta pérdida de información afecta seriamente la clasificación de la observación dentro de alguno de los estados conocidos del proceso. Para resolver esta dificultad, O. Llanes Santiago *et al.* ⁽²⁰⁾ proponen una metodología donde se realiza la imputación en línea para estimar los datos perdidos, utilizando herramientas de manejo de datos. A partir de realizada la imputación la clasificación de la observación es realizada demostrándose que se alcanzan elevados resultados de desempeño en el sistema de diagnóstico. La figura 4 presenta en un diagrama de flujo esta propuesta de metodología.

Los sistemas multimodo son aquellos que se caracterizan por tener varios modos de operación y procesos de tran-

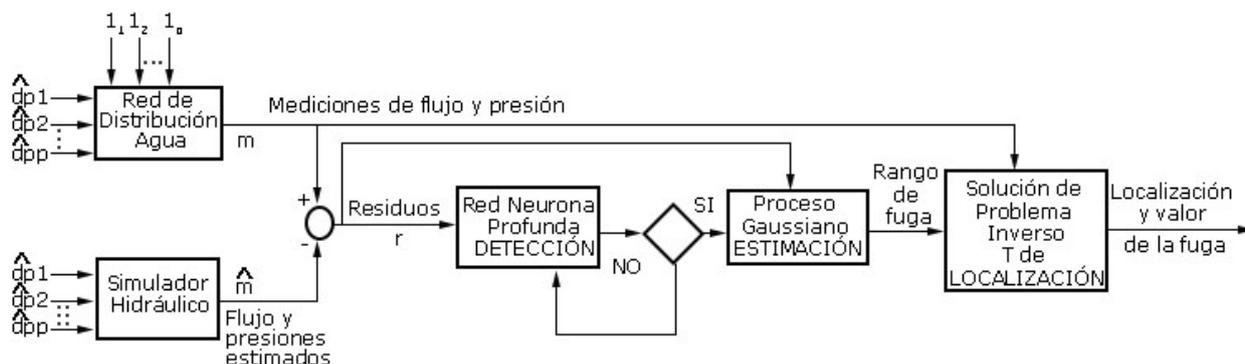


Fig. 3. Metodología en tres etapas para la detección y localización de fugas en redes de distribución de agua. ⁽¹⁾

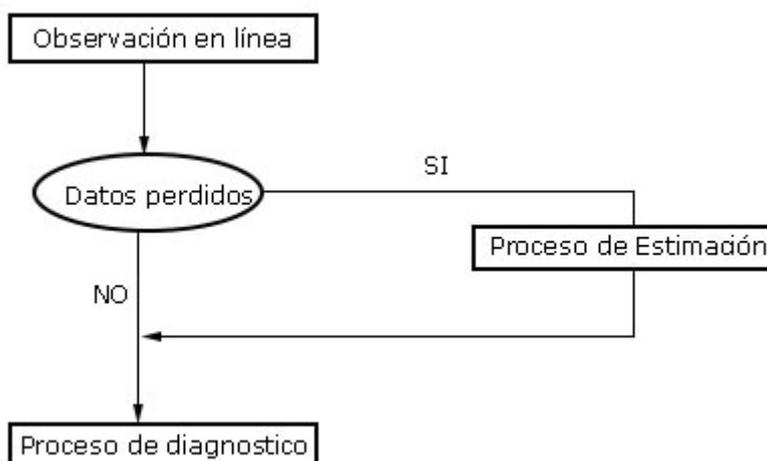


Fig. 4. Diagrama de flujo para el diagnóstico de fallos con datos perdidos. ⁽²¹⁾

sición entre los mismos. La mayor parte de las estrategias de diagnóstico de fallos presentes en la literatura científica están desarrolladas para ser aplicadas cuando el proceso esté en un modo de trabajo y no tienen un buen comportamiento cuando son aplicadas en los procesos de transición entre modos donde la mayoría de las variables están cambiando su valor en el tiempo. En esta investigación se realizan varias propuestas para el diagnóstico de fallos en los procesos de transición donde se tiene en cuenta la dinámica de las variables en la transición. ^(21,22,23)

Los niveles de automatización alcanzados por las redes de distribución de agua hacen factible la aplicación de estrategias basadas en manejo de datos para la detección y localización de fugas en redes de distribución de agua. En esta investigación se desarrolla un modelo de demanda en redes de distribución de agua que permite el uso de herramientas de manejo de datos para la detección de fugas con elevados desempeños y se analiza el comportamiento de varias herramientas de manejo de datos que permite encontrar aquellas que mejor desempeño tienen para este tipo de procesos. ^(24,25,26)

Evaluar la robustez de las herramientas de clasificación ante el ruido es un elemento muy importante a tener en cuenta para la selección de una herramienta de clasificación. En esta investigación se realiza una propuesta de índice que evalúa la robustez frente al ruido de diferentes herramientas de clasificación. ⁽²⁷⁾

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propuestas de metodologías presentadas en la sección anterior se aplicaron a problemas de pruebas reconocidos en la literatura científica que son representativos de procesos reales. Ejemplos según el *Tennessee Eastman process*, el tanque reactor continuamente agitado (*SCRT*) el sistema electromecánico *DAMADICS* representativo de una electroválvula y la red de distribución de agua *Modena* de la ciudad italiana del mismo nombre que está considerada una red compleja dada su dimensión.

Se escogieron esos procesos por ser representativos de los tipos de procesos con mayor presencia en Cuba en temas vitales como lo es la industria química, la industria mecánica y las redes urbanas de distribución de agua.

En todos los casos los resultados obtenidos fueron comparados con otras propuestas publicadas en la literatura científica internacional demostrándose la obtención de mejores resultados en el desempeño de los sistemas de diagnóstico de fallos con las metodologías propuestas.

Es necesario destacar en este análisis de los resultados es que la aplicabilidad en Cuba de estas propuestas de sistemas de diagnóstico de fallos se puede lograr si las industrias

tienen instalado un sistema *SCADA* que recolecta los valores de las principales variables. Es decir, no se necesitan inversiones nuevas para su aplicación inicial.

Los beneficios de la aplicación de estos sistemas en el país son directamente apreciables en las redes de distribución de agua para la detección y localización de fugas que hacen que se pierdan grandes cantidades de este vital líquido de manera sistemática en muchas de nuestras ciudades. En el caso de otras industrias como es el caso de las industrias del sector químico, farmacéutico del sector de refinación y del sector de producción de energía se reflejará en la disminución de los tiempos de parada, en sustituir el mantenimiento preventivo y correctivo por un mantenimiento predictivo en el momento que se necesite lo que disminuirá los costes de la actividad de mantenimiento, en la calidad de los productos finales de cada industria y en la seguridad de las industrias y el personal que labora en las mismas.

Conclusiones

En este trabajo se han presentado un grupo de nuevos paradigmas para mejorar el desempeño de sistemas de diagnóstico de fallos o monitoreo de condición en sistemas industriales. Las propuestas intentan dar solución a algunos problemas que afectan los sistemas de diagnóstico de fallos como son: ruido en las mediciones, pérdida de información en los canales de comunicación, nuevos patrones representativos de nuevos fallos, la detección de fallos en los procesos de transición en los sistemas multimodos entre otros, como evaluar la robustez de los diferentes tipos de clasificadores entre otros.

Para resolver lo anterior son utilizadas de manera efectiva técnicas de agrupamiento, de manejo de datos, imputación y herramientas computacionales provenientes del amplio mundo de lo que se conoce hoy como inteligencia computacional. Las propuestas son validadas en casos de estudio que representan sistemas de diferente naturaleza todos ellos representativos de áreas muy importantes en las perspectivas del país para su desarrollo, uso eficaz y eficiente de los recursos, ahorro, seguridad industrial y cuidado del medio ambiente. La factibilidad de transferencia tecnológica a la industria es inmediata.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, a CAPES, Fundación para la coordinación y mejora del personal de instituciones de Educación Superior de Brasil, Ministerio de Economía y Competitividad de España, Ministerio de Relaciones Exteriores de México, Instituto Politécnico, Universidade do

Estado do Rio de Janeiro (IP-UERJ), Universidad de Granada, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Consejo Nacional para el desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) de Brasil, Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado (AUIP), a la Fundación Carlos Chagas Filho para el apoyo a la investigación del estado de Río de Janeiro (FAPERJ) y al Proyecto Nacional CITMA "Nuevos paradigmas en el diagnóstico de fallas de sistemas industriales", Programa Nacional de Automática, Robótica e Inteligencia Artificial por su apoyo en el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rodríguez Ramos A., Dominguez García R., Verdegay Galdeano J.L., Llanes Santiago O. Fault diagnosis in a steam generator applying Fuzzy Clustering Techniques. In Cruz Corona C editor. *Soft Computing for Sustainability Science, Studies in Fuzziness and Soft Computing Series*. Springer International; 2018.358:217-34. ISSN: 1434-9922. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62359-7_11
2. Rodríguez Ramos A., Bernal de Lázaro J.M., Prieto Moreno A., Silva Neto A.J., Llanes Santiago O. An approach to robust fault diagnosis in mechanical systems using computational intelligence. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2019;30(4):1601-15. ISSN: 0956-5515. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1343-1>
3. Rodríguez Ramos A., Llanes Santiago O., Bernal de Lázaro J.M., Cruz Corona C., Silva Neto A.J., Verdegay Galdeano J.L. A novel fault diagnosis scheme applying fuzzy clustering algorithms. *Applied Soft Computing*. 2017;58:605-19. ISSN:1568-4946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.04.071>
4. Rodríguez Ramos A., Bernal de Lázaro J.N., Silva Neto A.J., Cruz-Corona C., Verdegay J.L., Llanes Santiago O. An approach to fault diagnosis using fuzzy clustering techniques. In: Kacprzyk J., Szmjdt E., Zadrozny S., Atanassov K., Krawczak M. editors. *Advances in Fuzzy Logic and Technology*. Springer. *Advances in Intelligent Systems and Computing Series*. Springer. 2017;643:232-43. ISSN: 2194-5357. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66827-721>
5. Rodríguez Ramos A., Bernal de Lázaro J. M., Silva Neto A.J., Llanes Santiago O. Fault Detection Using Kernel Computational Intelligence Algorithms, Computational Intelligence, Optimization and Inverse Problems with applications in engineering. In Mendez Platt G., Yang XS, Silva Neto AJ editors. Springer; 2019:263-80p, ISBN:978-3-319-96432-4. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96433-1>
6. Rodríguez Ramos A., Silva Neto A.J., Llanes Santiago O.; A Proposal of Hybrid Fuzzy Clustering Algorithm with Application in Condition Monitoring of Industrial Processes. In Bello R., Falcon R., Verdegay JL editors. *Uncertainty Management with Fuzzy and Rough Sets. Studies in Fuzziness and Soft Computing Series*, Springer. 2019;377:3-30. ISSN: 1434-9922. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-10463-4_1
7. Rodríguez Ramos A., Prieto Moreno A., Silva Neto A.J., Llanes Santiago O. A proposal on-line detection of new faults and automatic learning in fault diagnosis. In Pelta DA, Cruz-Corona C editors. *Soft Computing Based Optimization and Decisions Models, Studies in Fuzziness and Soft Computing Series*, Springer International; 2018. 360:99-118, ISSN: 1434-9922. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-64286-4_6
8. Rodríguez Ramos A., Silva Neto A.J., Llanes Santiago O. An approach to fault diagnosis with online detection of novel faults using fuzzy clustering. *Expert Systems and Applications*. 2018;113(15):200-12. ISSN: 0957-4174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.055>
9. Llanes Santiago O., Prieto Moreno A., Bernal de Lázaro J.M., Knupp D.C., Silva Neto A.J. A design proposal for multiblock-based fault diagnosis systems in complex industrial plants. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017;162:49-159. ISSN: 0169-7439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemo-lab.2017.01.015>
10. Quiñones Grueiro M., C. Verde, Llanes Santiago O. Novel Leak Location Approach in Water Distribution Networks with Zone Clustering and Classification. In Carrasco-Ochoa J., Martínez-Trinidad J., Olvera-López J., Salas J. editors. *Pattern Recognition. MCPR 2019. Lecture Notes in Computer Science*, Springer. 2019;11524:37-46. ISSN: 1611-3349. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21077-9_4
11. Quiñones Grueiro M., Verde C., Prieto Moreno A., Llanes Santiago O. An unsupervised approach to leak detection and location in water distribution networks. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences*. 2018; 28(2):283-95. ISSN: 2083-8492. DOI: <https://doi.org/10.2478/amcs-2018-0020>
12. Sánchez Rivero M., Quiñones Grueiro M., Rosete Suárez A., Llanes Santiago O. A Novel Approach for Leak Localization in Water Distribution Networks Using Computational Intelligence, In Llanes Santiago O, Cruz Corona C, Silva Neto AJ and Verdegay JL editors. *Computational Intelligence in Emerging Technologies for Engineering Applications. Studies in Computational Intelligence Series*, Springer. 2020;872:103-22. ISSN 1860-9503. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-34409-2_6
13. Sánchez Rivero M., Quiñones Grueiro M., Cruz Corona C., Silva Neto A.J., Llanes Santiago O., A Proposal of Robust Leak Localization in Water Distribution Networks Using Differential Evolution. In Martínez Álvarez F, Troncoso Lora A, Sáez Muñoz J, Quintián H., Corchado E. editors *14th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2019)*. *SOCO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing Series*. Springer. 2019,950:311-20. ISSN:2194-5365. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20055-8_30
14. Camps Echevarría L., Llanes Santiago O., Campos Velho H., Silva Neto A.J., "Fault Diagnosis Inverse Problem: Solution with Metaheuristics, *Studies in Computational Intelligence Series*, Springer. 2019;763:1-183. ISSN: 1860-9503. ISBN: 978-3-319-89977-0. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-89978-7>
15. Camps Echevarría L., Llanes Santiago O., Silva Neto A.J. A Bioreactor Fault Diagnosis Based on Metaheuristics. *Computational Intelligence. Optimization and Inverse Problems with applications in engineering*. In Mendez Platt G., Yang XS, Silva Neto AJ editors. Springer; 2019. 139-64 p. ISBN:978-3-319-96432-4. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96433-1>
16. Oliveira C., Junior J., Knupp D.C., Silva Neto A.J., Prieto Moreno A., Llanes Santiago O. Estimation of kinetic parameters in chro-

- matographic separation model via Bayesian inference. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. 2018;34(1) ISSN:0213-1315. DOI: <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2017.12.002>
17. Quiñones Grueiro M., Ares Milán M., Sánchez Rivero M., Silva Neto A.J., Llanes Santiago O. Robust Leak Localization in Water Distribution Networks using Computational Intelligence. *Neurocomputing*. 2021;438:195-208. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.20.2004.159>
 18. Rivera Torres P., Llanes Santiago O., Fault Detection and Isolation in Smart Grids Devices Using Probabilistic Booleans Networks, In Llanes Santiago O, Cruz Corona C, Silva Neto AJ and Verdegay JL editors. *Computational Intelligence in Emerging Technologies for Engineering Applications*. Studies in Computational Intelligence Series, Springer. 2020;872:165-85. ISSN 1860-9503. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-34409-2_10
 19. Rivera Torres P., Silva Neto A.J., Llanes Santiago O., Multiple Fault Diagnosis in Manufacturing Processes and Machines Using Probabilistic Boolean Networks. In Martínez Álvarez F., Troncoso Lora A., Sáez Muñoz J., Quintián H., Corchado E. editors 14th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2019). SOCO 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing Series*. Springer. 2019;950:335-65. ISSN:2194-5365. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20055-8_34
 20. Llanes Santiago O., Rivero Benedito B.C., Gálvez Viera S.C., Rodríguez Morant E.F., Torres Cabeza R., Silva Neto A.J. A fault diagnosis proposal with online imputation to incomplete observations in industrial plants. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2019;18(1):83-98. ISSN: 1665-2738. DOI: [10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n1/Llanes](https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n1/Llanes)
 21. Quiñones Grueiro M., Llanes Santiago O., Silva Neto A.J. Monitoring Multimode Continuous Processes: A Data Driven Approach. In Kacprzyk J editor. *Studies in Systems, Decision and Control Series*. Springer, 2021,309:1-155. ISSN: 2198-4182. ISBN: 978-3-030-54737-0. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-54738-7>
 22. Quiñones Grueiro M., Prieto Moreno A., Verde C., Llanes Santiago O. Data-driven monitoring of multimode continuous processes: A review. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2019;19:56-71. ISSN: 0169-7439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2019.03.012.2019>
 23. Acevedo Galán D.L., Quiñones Grueiro M., Prieto Moreno A., Llanes Santiago O. A new approach for fault diagnosis of industrial process during transitions. In Hernández Heredia Y., Milián Nuñez V. and Ruiz Schulcloper J. *Progress in Artificial Intelligent and Pattern Recognition*, 6th International Workshop, IWAIPR 2018 Proceedings. *Lecture Notes and Computer Sciences Serie*, Springer. 2018;11047:342-50. ISSN 0302-9743, ISBN: 978-3-030-01131-4, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-01131-1>
 24. Quiñones Grueiro M., Verde C., Llanes Santiago O. Comparison of Classifiers for Leak Location in Water Distribution Networks. *IFAC PapersOnline*. 2019; 51(24):407-13. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.609>
 25. Quiñones Grueiro M., Verde C., Llanes Santiago O. Demand Model in Water Distribution Networks for Fault Detection. *IFAC-Paperonline*. 2017;50(1):3263-68. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.460>
 26. Quiñones Grueiro M., Verde C., Llanes Santiago O. Features of Demand Patterns for Leak detection in Water Distribution Networks. In Verde C., Torres L. editors. *Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks*. *Applied Condition Monitoring*. Springer. 2017;7:171-82. ISSN: 2363-6998 ISBN: 978-3-319-55943-8 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-55944-5_9
 27. Bernal De Lázaro J.M., Llanes Santiago O., Prieto Moreno A., del Castillo-Serpa A., Silva Neto A.J. A novel index for the robustness comparison of classifiers in fault diagnosis. *Neurocomputing*, 2018;275:636-48. ISSN:0925-2312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.09.021>

Recibido: 24/05/2021

Aprobado: 06/08/2021

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses relacionados con el contenido del artículo con las instituciones a las que pertenecen ni con ninguna otra entidad o institución.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Orestes Llanes Santiago, Antônio J. Silva Neto, Marcos Quiñones Grueiro, Alberto Prieto Moreno, Adrián Rodríguez Ramos, José Manuel Bernal de Lázaro, Cristina Verde Rodarte, Lídice Camps Echeverría, Pedro Rivera Torres.

Curación de datos: Orestes Llanes Santiago, Marcos Quiñones Grueiro, Adrián Rodríguez Ramos, José Manuel Bernal de Lázaro, Maibeth Sánchez Rivero, Pedro Rivera Torres.

Análisis formal: Orestes Llanes Santiago, Antônio J. Silva Neto, Marcos Quiñones Grueiro, Alberto Prieto Moreno, Adrián Rodríguez Ramos, José Manuel Bernal de Lázaro, Cristina Verde Rodarte, Lídice Camps Echeverría, José Luís Verdegay Galdeano, Carlos Cruz Corona, Maibeth Sánchez Rivero, Diego Campos Knupp, Pedro Rivera Torres, Haroldo Fraga Campos Velho

Adquisición de fondos: Orestes Llanes Santiago, Antônio J. Silva Neto, Cristina Verde Rodarte, José Luís Verdegay Galdeano.

Investigación: Orestes Llanes Santiago, Antônio J. Silva Neto, Marcos Quiñones Grueiro, Alberto Prieto Moreno, Adrián Rodríguez Ramos, José Manuel Bernal de Lázaro, Cristina Verde Rodarte, Lídice Camps Echeverría, José Luís Verdegay Galdeano, Carlos Cruz Corona, Maibeth Sánchez Rivero, Diego Campos Knupp, Pedro Rivera Torres, Haroldo Fraga Campos Velho.

Metodología: Orestes Llanes Santiago, Antônio J. Silva Neto, Marcos Quiñones Grueiro, Alberto Prieto Moreno, Lídice Camps Echeverría.

Administración del Proyecto: Orestes Llanes Santiago, Antônio J. Silva Neto, Cristina Verde Rodarte, José Luís Verdegay Galdeano.

Recursos: Orestes Llanes Santiago, Antônio J. Silva Neto, Cristina Verde Rodarte, José Luís Verdegay Galdeano.

Software: Marcos Quiñones Grueiro, Alberto Prieto Moreno, Adrián Rodríguez Ramos, José Manuel Bernal de Lázaro, Lídice Camps Echeverría, Maibeth Sánchez Rivero, Pedro Rivera Torres.

Supervisión: Orestes Llanes Santiago, Antônio J. Silva Neto, Marcos Quiñones Grueiro, Alberto Prieto Moreno, Cristina Verde Rodarte, Pedro Rivera Torres, Haroldo Fraga Campos Velho

Validación: Marcos Quiñones Grueiro, Alberto Prieto Moreno, Adrián Rodríguez Ramos, José Manuel Bernal de Lázaro, Lídice Camps Echeverría, Maibeth Sánchez Rivero, Pedro Rivera Torres.

Visualización: Orestes Llanes Santiago, Antônio J. Silva Neto, Marcos Quiñones Grueiro, José Luís Verdegay Galdeano.

Redacción-borrador original: Orestes Llanes Santiago, Marcos Quiñones Grueiro, Adrián Rodríguez Ramos, José Manuel Bernal de Lázaro, Lídice Camps Echeverría, Maibeth Sánchez Rivero, Pedro Rivera Torres.

Redacción-revisión y edición: Orestes Llanes Santiago, Antônio J. Silva Neto, Marcos Quiñones Grueiro, Alberto Pri-

to Moreno, Cristina Verde Rodarte, Lídice Camps Echeverría, José Luís Verdegay Galdeano.

Financiación

El desarrollo de esta investigación fue favorecido por financiamiento para estancias de investigación y becas doctorales y postdoctorales otorgadas por: Programa de Internacionalización Institucional CAPES PrInt 41/2017, Proceso No. 88887.311757/2018-00; Proyecto TIN2017-86647-P del Ministerio de Economía y Competitividad de España que incluye fondos de la Unión Europea; Programa de estudios del gobierno de México para estudiantes extranjeros DGAPA IT 100716 UNAM; Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado (AUIP) y por financiamiento aportado en proyectos de investigación por la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE.

Cómo citar este artículo

Llanes Santiago O, Silva Neto AJ, Quiñones Grueiro M, Prieto Moreno A *et al.* Nuevos paradigmas en el diagnóstico de fallos en sistemas industriales. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba* [internet] 2022[citado en día, mes y año];12(1): e1033. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1033>

