

## **TÉCNICAS PARA MONITORIZAR EL DESEMPEÑO RELATIVO DE LA OPERACIÓN DE CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y RENOVABLES ANTE ACCIONES DEGRADANTES DE LENTO DESARROLLO.**

**ENTIDAD EJECUTORA PRINCIPAL:** Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente (UO).

**AUTOR PRINCIPAL:** Luis Vázquez Seisdodos<sup>1</sup>

**OTROS AUTORES:** David Díaz Martínez<sup>1</sup>, Rafael Arturo Trujillo Codorniú<sup>1</sup>, Jesus Maria Blanco Ilzarbe<sup>2</sup>, Ing. Yrjö Majanne<sup>3</sup>, Jyrki Luukkanen<sup>4</sup>, Francisco Peña Fernández<sup>2</sup>, Rolando Ramis Rosales<sup>1,5</sup>, Jose Manuel Rodriguez Pérez<sup>1,6</sup>

**COLABORADORES:** Alvaro Aguilera Castillo. Departamento de Control Automático, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba; José Alfredo Pérez Milanés Departamento de Control Automático, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba; Misbel Palmero Aguilar. Experto de operaciones en Centrales Eléctricas. Central Termoeléctrica de Matanzas; Juan Carlos Peña Céspedes. Experto de operaciones en Centrales Eléctricas. Central Termoeléctrica de Felton; Orlando Castro Gámez. Experto en Automática en Centrales Eléctricas. Central Termoeléctrica de Felton; Jeffrey D. Kelly. Gerente de la empresa algoritmos industriales. Toronto, Canadá; Jorge Enrique Olmo Velázquez. INEL Renovable. La Habana; Jairo Blanco Cabrera, empresa azucarera. Holguín; Susana Pérez Palma, Empresa de diseño de simuladores industriales. La Habana; Manuel Rodríguez Sierra, Empresa eléctrica. Santiago de Cuba.

### **FILIACIÓN:**

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente (UO), Cuba

<sup>2</sup>Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, España.

<sup>3</sup>Departamento de Automática, Ciencia e Ingeniería, Universidad de Tecnología de Tampere, Finlandia.

<sup>4</sup> Centro de Investigaciones Futuras de Finlandia, Universidad de Turku, Finlandia.

<sup>5</sup> Departamento de Automática, Refinería "Hermanos Díaz"

<sup>6</sup> Departamento de Automática. CTE Este Habana

### **AUTOR PARA LA CORRESPONDENCIA**

Luis Vázquez Seisdodos

Dirección particular: Carretera del Morro 211 CP 90200. Ciudad de Santiago de Cuba

Teléfono Casa: (22) 623546

Teléfono Móvil: 53818652

Teléfono Jefe Dpto.: (22) 601162

Teléfono Jefe Decano: 52794197

lvazquez@uo.edu.cu

[lvazquez0211@gmail.com](mailto:lvazquez0211@gmail.com)

saddid@uo.edu.cu (j' Dpto.)

decanofie@consejo.uo.edu.cu (Decano FIE)

## **RESUMEN**

Las acciones degradantes de lento desarrollo en el lapso de horas y días afectan el aporte ininterrumpido en potencia de cada unidad generadora al sistema eléctrico. Descifrar desde series de tiempos, los efectos de los deterioros físicos que se suceden da lugar al problema científico de la investigación: Las limitaciones que se presentan al procesar los registros, por variables seleccionadas, que portan mediciones contaminadas con ruido para monitorizar los efectos de las acciones degradantes en la unidad de generación a partir de la estimación certera de las desviaciones en estado estacionario entre la magnitud actual y una de referencia en condición de buen comportamiento relativo, y como objetivo proponer un método para la detección de intervalos de tiempo en Estado Estacionario y un procedimiento para el diseño y la explotación de un sistema de monitorización del desempeño de la operación de la unidad de generación ante degradaciones de lento desarrollo. La instrumentación actual permite contar con registros históricos. La investigación resume como aportes científicos los siguientes: 1) Se desarrolla un método nuevo para la detección de estados estacionarios capaz de aportarle datos precisos y exactos a la monitorización, 2) Se introduce una metodología novedosa para calibrar al método de detección de estados estacionarios fuera de línea como vía de asegurar su desempeño en un sistema de tiempo real, 3) Se aporta un procedimiento nuevo para monitorizar el desempeño de la operación de subprocesos de unidades de generación a partir de valores de estado estacionario, 4) Se aporta una estructura de modelo, heurísticamente fundamentada, para capturar los valores que representan al buen desempeño relativo después de cada arranque por mantenimiento. En tanto, se obtienen como aportes prácticos los siguientes: 1) En la estimación de la varianza del ruido en registros industriales con diferente relación señal a ruido y formas de tendencia en torno al valor medio se logró un error relativo máximo del 5 %, 2) en la caracterización de la variabilidad de las desviaciones por variable seleccionada se verificó que la partición de la ventana de largo periodo con referencia al momento de arranque por mantenimiento en ventanas de menor escala de tiempo, sucesivas y no conexas, permite localizar la génesis de las acciones degradantes que provocan estos tipos de perturbaciones de lento desarrollo. Esta verificación

constituye una vía de solución al diagnóstico del estado de la planta y las causas de desbalance en los sistemas de regulación automática. Asimismo, de la aplicación adecuada de los resultados derivados de estos estudios se obtiene como aporte económico, que con la está conversión de datos en conocimiento sobre la planta, se beneficia el nivel de acierto en la toma de decisiones tanto sobre el grado de desempeño la operación actual como de una posible parada oportuna para mantenimientos de diferentes categorías, todo lo cual reduce costos y afectaciones al sistema eléctrico nacional confiriéndole una vida útil más larga. Los resultados obtenidos permiten aproximar los valores correspondientes a intervalos de tiempo coincidentes de varias variables en desviaciones en estado estacionario con exactitud y precisión con lo cual se tiene capacidad para decidir sobre el momento oportuno de los mantenimientos. Los resultados de la presente investigación lo avalan la publicación de 7 artículos del Grupo I; 2 del Grupo II; 3 del Grupo III; 8 del Grupo IV; 8 Congresos internacionales; 1 tesis doctoral; 3 tesis de maestría y 10 trabajos de diploma.

### **COMUNICACIÓN CORTA DEL RESULTADO**

La explotación ininterrumpida de la Unidad de Generación Eléctrica (UGE) ante condiciones de variabilidad de las propiedades físico-químicas del carburante suministrado requiere de técnicas y procedimientos para monitorizar, a diferentes plazos de tiempo el estado de su desempeño actual con el objetivo de tener la capacidad de decidir sobre el momento oportuno de los mantenimientos, alargar el tiempo de vida útil, minimizar los gastos de generación, reducir el número de paradas no planificadas y los costos de mantenimientos.

Las UGE son entidades complejas en cuanto a la interrelación dinámica implícita entre variables causa-efecto. En su trabajo ininterrumpido está sometida a las acciones perturbadoras del buen desempeño, entre las cuales pueden citarse; los cambios en la demanda de los clientes, las variaciones de las condiciones de operación actuales respecto a las que se previeron por diseño, las degradaciones lentas de partes y piezas, las malas tomas de decisiones de los operadores desde el cuarto de control central, y son los medios técnicos de automatización a los cuales el hombre conecta con el proceso físico mediante sensores y actuadores los que tienen la tarea de estabilizarle y regularle a cada variable de los diferentes tipos de subprocesos que la componen, su respectivo valor prescrito o deseado y que estas dos acciones se logren dentro de los intervalos de tolerancias permisibles. La automatización se lleva a cabo mediante una estructura jerárquica acuñada bajo el término de control de planta completa.

Por la escala de tiempo en que ocurren las perturbaciones, el control de la planta completa puede estar afectado por los siguientes tres tipos: persistente, fallos y de lento desarrollo. Esta última es una causa predominante en la reducción del desempeño de la operación y la eficiencia. Precisamente, por su acción de desgaste tan lenta es la más difícil de detectar oportunamente. La automatización de la planta contrarresta sus efectos negativos actuando sobre

las variables manipuladas. Si bien este rol de la automática garantiza la operación al costo de ineficiencia que pueda interponer los excesivos niveles de degradación no detectados oportunamente, el sistema de protecciones puede determinar una salida imprevista de la UGE, con lo cual el perjuicio ya no puede ser mayor. Constituyen perturbaciones de lento desarrollo: la suciedad en las superficies exteriores de intercambiadores de calor, las fugas de vapor, la pérdida de aislamientos en tuberías, el desgaste de impelentes, entre otros. Estas les representan al sistema de control un tipo de perturbación que se desarrolla en una escala de tiempo del orden de horas, días y semanas.

Para identificar las perturbaciones por tipo e inferir sus efectos sobre el desempeño de la operación de una planta, la literatura científica muestra abundante presencia de los tipos persistente y los fallos, lo cual no ocurre así para las de lento desarrollo. El resultado logrado con esta investigación se debe a introducir la detección de estados estacionarios (DEE) como técnica capaz de constituir la fuente de datos precisos y exactos para la monitorización de los efectos de este tipo.

Por otro lado, el desempeño se evalúa por las magnitudes de las desviaciones entre el valor actual de estado estacionario (EE) de cada variable respecto al valor que debería tener en una operación deseada. Este último valor o de referencia puede disponerse en dos formas: como un valor especificado por diseño (valores normativos), y como un valor establecido de las pruebas de comportamiento (después de los mantenimientos). A éstos se le denominan de buen desempeño de la operación y son relativos a partir del arranque después de cada procedimiento de mantenimiento.

En un sistema dinámico multivariable, la monitorización de los efectos de perturbaciones de lento desarrollo identificando los valores de EE en series de tiempo conlleva a la complejidad de enfrentar ese cómputo sobre segmentos de muestras que están contaminadas con ruido auto-correlacionado (coloreado), para lo cual se impone el establecimiento certero en los criterios de selección del ancho de la ventana exploratoria, ensayar y determinar la robustez del método de la DEE sobre las disímiles formas de onda que se pueden presentar, las cuales por demás, pueden transcurrir con diferentes duración en las transiciones entre puntos de operación en potencia, todo lo cual debe garantizarse para un amplio rango de valores coordinado por el centro de despacho de carga (CDC). La DEE por sí sola no basta, si bien un método robusto aporta los valores de EE por variable, se necesita de una técnica de modelado por variable que la relacione con el punto de operación actual en potencia lo que permite la predicción de cada valor de buen comportamiento relativo. El momento de aplicar la DEE es clave para coleccionar los datos que requiere la modelación del buen comportamiento relativo.

Al evaluar los métodos disponibles para la DEE se apreciaron insuficiencias en su robustez, se detectó que en la literatura científica predominaba el interés por la industria de procesos químicos, principalmente la refinación de petróleo y sus derivados. Se evidenció la escasa presencia de enfrentar esta problemática de investigación a favor del sector eléctrico, es decir, sobre las UGE basadas en ciclos térmicos y conversión fotovoltaica. La revisión de la literatura científica denotó falta de precedencia en la definición de un procedimiento que trazara

las pautas en la monitorización del desempeño de la operación afectada sistemáticamente por las perturbaciones de lento desarrollo. Estas razones conducen a la necesidad de una investigación científica que asumiera como problema científico al siguiente: las limitaciones que existen para monitorizar certeramente, con técnicas de DEE, el desempeño relativo de la operación de las UGE bajo la acción de perturbaciones de lento desarrollo. El objetivo es proponer un método para la detección de intervalos de tiempo en EE y un procedimiento para el diseño y la explotación de un sistema de monitorización del desempeño de la operación de la UGE ante perturbaciones de lento desarrollo. Los resultados obtenidos constituyen una respuesta científica al lineamiento 197 aprobado para el periodo 2016-2021 por el Congreso del Partido Comunista de Cuba en abril del 2016.

## **Resultados**

Las UGE son entidades industriales que se rigen por una estricta normativa de seguridad industrial. Esto significa que en la aplicación de las técnicas de diseño de experimentos para ensayar y validar el resultado que aquí se promueve hay que ofrecer soluciones alternativas tal que se combine la realización de ensayos con registros sintéticos y con registros reales. El resultado consiste en un método robusto para la DEE, una estructura de modelo matemático que requiere de pocos puntos para su ajuste por interpolación con polinomios cúbicos de Hermite, y un procedimiento que los integra y establece el conjunto de criterios que ellos requieren. El resultado está publicado como sigue:

- (i) Construcción y validación de modelos de simulación a procesos de conversión de energía que permiten ser la base de generación registros sintéticos que reproducen las características de los registros reales [1-3].
- (ii) Desarrollo de herramientas computacionales para generar series de tiempo de procesos de la UGE, detectar visual y automáticamente los EE y verificar resultados en curvas de distribución de probabilidades, construir curvas de buen comportamiento relativo y estimar las desviaciones por variables [4-5].
- (iii) Definitivamente, las pautas para monitorizar los efectos de las perturbaciones de lento desarrollo sobre las UGE cubren el vacío existente con el procedimiento publicado en sus diferentes etapas de maduración científica [6-9].

En [10] se recoge, en profundidad, el colofón ofrecido a la comunidad internacional con aportes significativos de un método robusto en la DEE, los criterios de selección de ancho de ventanas, las técnicas para la extracción de tendencias y estimación de varianza del ruido contaminante, y la técnica para la construcción con pocos puntos de curvas de referencia de buen comportamiento relativo después del arranque por mantenimiento.

La aplicación del método y el procedimiento a centrales termoeléctricas tiene el siguiente aporte práctico: en la estimación de la varianza del ruido ante registros industriales con diferente relación señal a ruido y formas de tendencia entorno al valor medio se logró un error relativo máximo del 5 %, en la caracterización de la variabilidad de las desviaciones por variable seleccionada

se verificó que la partición de la ventana de largo periodo con referencia al momento de arranque por mantenimiento en ventanas de menor escala de tiempo, sucesivas y no conexas, permite localizar la génesis de las acciones degradantes que provocan estos tipos de perturbaciones de lento desarrollo todo lo cual permite arribar a la siguiente implicación de aporte económico: la transformación de registros industriales a conocimiento de planta constituye un sistema asesor para la toma de decisiones tanto de la operación actual como en la parada de planta para mantenimientos de diferentes categorías.

Las etapas del procedimiento y las técnicas de procesamiento de series de tiempo fueron ensayadas en beneficio de procesos de las siguientes de tres centrales termoeléctricas cubanas: Felton, Rente, y Este-Habana, así como en las calderas de los centrales azucareros que cogeneran con bagazo de caña de azúcar, como el Complejo Agroindustrial "Guiteras" de Las Tunas. Los resultados fueron validados en los subsistemas, tales como: calentador de aire regenerativo, etapas de sobrecalentamiento convectivo y radiante, economizadores, entre otros. Los mismos indican que pueden ser generalizados al resto de subprocesos de la UGE.

Es importante resaltar que la identificación de estados estacionarios, como método para detectar los efectos de perturbaciones de lento desarrollo en sistemas complejos con control de planta completa, y su aplicación al sector de generación eléctrica son inéditos.

### **Conclusiones**

Los resultados teóricos y experimentales permiten una monitorización del desempeño de la operación, en tiempo real, como herramienta que gestiona la eficiencia de la planta, la sostenibilidad de las inversiones y la efectividad oportuna de su mantenimiento. Su implantación es la condición necesaria para el desarrollo de un sistema de alerta temprana al nivel de planta y promueve la introducción sistemática en Cuba del denominado sistema asesor de la explotación de la UGE, lo cual permite convertir las minas de registros existentes en conocimiento.

### **REFERENCIAS**

[1] Ozana S., Pies M., Vazquez L. Use of Methods of Statistic Dynamics Applied for Analysis of Steam Superheater. Electrical Review, ISSN 0033-2097, R. 87 NR 8/2011, Pp 154-158. INSPEC and SCOPUS.

[2] Majanne Y., Vazquez L. Sliding Back Pressure Control in Industrial CHP Plants. 8th Power Plant & Power System Control Symposium - PPPSC 2012, 2 – 5, September, Toulouse, France.

[3] Vázquez L., Luukkanen J., Kaisti H., Käkönen M., Majanne Y. Decomposition analysis of Cuban energy production and use: Analysis of energy transformation for sustainability. Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews (2015), pp. 638-645.

[4] Vázquez L., Aguilera A, Díaz D., Ramis R., Rodríguez JM. Industrial Multivariate Explorer: A solution with Matlab for time series mining. Journal of Eng. and Tech. for Ind. Applications (2015), Vol. 1, pp 74-79. ISSN 2447-0228.

[5] Blanco JM, Vazquez L, Peña F., Diaz D. Diagnosing steam production systems on their multivariable steady states. 8th Power Plant & Power System Control Symposium - PPPSC 2012, 2 – 5, September, Toulouse, France.

[6] Blanco JM, Vazquez L, Peña F., Investigation on a new methodology for thermal power plant assessment through live diagnosis monitoring of selected process parameters; application to a case study, Energy 42 (2012), pp.170-180.

[8] Blanco JM, Vazquez L, Peña F., Diaz D. New Investigation on Diagnosing Steam Production Systems from Multivariate Time Series Applied to Thermal Power Plants, Applied Energy 101 (2013) 589–599.

[9] Vázquez L., Trujillo, R.A, Llosas, Y., Díaz, D. Método para detección de estados estacionarios: aplicación a unidades de generación eléctrica. Revista RIELAC, Vol.XXXV, No. 2, p.45-61, enero – abril, 2014, ISSN: 1815-5928.

[10] Vázquez L., Blanco JM, Ramis R., Peña F., Diaz D. Robust methodology for steady state measurements estimation based framework for a reliable long term thermal power plant operation performance monitoring. Energy 42 (2015), pp. 923-944.