

Monitorización y diagnóstico de centrales térmicas: Desarrollo de un detector visual de estados estacionarios

Power plant monitoring and diagnosis: Development of a visual steady state detector

Luis Vázquez¹, Jesús María Blanco^{2*}, Francisco Peña², José Manuel Rodríguez³

Recibido: Marzo 2014

Aceptado: Julio 2014

Resumen.- Se presenta el diseño y las prestaciones de una aplicación desarrollada en Matlab®, orientada a dar soporte de cálculo para el tratamiento de los valores medios aproximados de intervalos de tiempo que resultan de la selección visual de series temporales que es el formato con el que se consideran a los registros industriales. Los datos de entrada pueden provenir de registros históricos de procesos industriales (termo-energéticos) ó de aquellos generados mediante simulación directa a través de la aplicación Simulink. El objetivo de este estudio es la monitorización de los diferentes estados cuasi-estacionarios (QSS) en una central térmica, a fin de poder identificar y realizar la diagnosis de posibles fallos. Pueden ser visualizadas hasta 8 señales linealmente normalizadas y distribuidas y el usuario, mediante dos cursores, puede seleccionar ventanas cortas de señales almacenadas. En esta versión, se computan datos estadísticos que facilitan el modelado estático, los cuales podrán ser exportados a un fichero Excel. Es una aplicación abierta, por lo que permite la inclusión de nuevas prestaciones. Un comando específico facilita el modelado dinámico y su aplicabilidad se demuestra con un ejemplo de análisis de series temporales provenientes de una central térmica de 250 MWe.

Palabras claves: Series temporales; minería de datos, diagnóstico, pronóstico, generadores de vapor.

Summary.- *The design and features of a Matlab® application, focused to providing support for data mining by serial time computing is presented. The input data come from both historical records from industrial (thermo-energetic) processes but also it can be generated by direct simulation through the Simulink application. The aim of this study is the monitorization of the different quasi-stationary states (QSS) in a power plant, in order to identify and perform the diagnosis of possible malfunctions. Up to 8 signals, linearly normalized and distributed can be visualized and the user, by means of two cursors, can select short windows of recorded signals. In this version, statistical data are computed, facilitating the static modeling which can be exported to an Excel file. It is an open software application allowing the implementation of new features. A particular command makes easier the dynamic modeling and its applicability is exemplified by analysis of times series from a particular 250 MWe thermal power plant.*

Keywords: *Time series, data-mining, diagnosis, prognosis, steam generators.*

1 Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, lvazquez@fie.uo.edu.cu

2*Dpto. Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos, Escuela Superior de Ingeniería, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Bilbao, España, jesusmaria.blanco@ehu.es (autor de correspondencia)

3 Central Termoeléctrica Habana, Santa Cruz del Norte, Mayabeque, Cuba, josemrod@ctehabana.une.cu

1. Introducción.- La evolución de los sistemas de automatización hacia aquellos denominados “Sistemas Control Distribuido” (del inglés; DCS) y en general del software instalado en los ordenadores de supervisión [1], así como la facilidad de establecer compactos sistemas de Registro de Datos (del inglés Data-logger) conducen a la generación de gran volumen de información. La supervisión de procesos se encarga de observar continuamente las variables del proceso en busca de la detección de anomalías que puedan representar un problema operativo ó de calidad [2, 3]. A ello se le destinan como sub-tareas la detección y diagnóstico de fallos y el análisis de procesos. Dependiendo del horizonte de tiempo con el que se trabaja, la supervisión se puede aplicar a 2 niveles:

- A corto plazo: En este nivel las variables del proceso se observan continuamente. La meta es detectar cualquier desviación con respecto al estado normal del proceso y reaccionar lo más rápidamente posible para asegurar la operación normal de la planta [4]. El término monitorización se utiliza para referirse a este nivel, con énfasis en la detección e identificación de fallos.
- A largo plazo: En este nivel se analiza el comportamiento del proceso a largo plazo, a través de los datos históricos. La meta es identificar las causas de un hipotético bajo rendimiento así como oportunidades de mejora. Los términos “Análisis del proceso” o “Mejora del Proceso” se utilizan para designar este tipo de supervisión [5, 6].

1.1. Motivación.- La monitorización de procesos es esencial para mantener una elevada calidad en la producción al igual que para su seguridad [7]. En la Figura I se muestra un proceso dinámico controlado (PD) multi-variable, en general de parámetros distribuidos, con existencia de fenómenos de transporte. La Figura Ia delimita sus fronteras por el carácter multidimensional de las señales asociadas a cada variable medida mientras que la Figura Ib muestra una representación estática, la cual se muestra sólo con fines ilustrativos, de un hipotético caso bi-variado. Sobre una superficie aproximadamente plana, paralela al plano x-y se ubican las variables reguladas (y_{rr}) para distinguir su valor cuasi-estacionario e independiente de las posibles entradas de carga (d_i) y sobre otra superficie se ubican aquellas variables de seguimiento de la carga o demanda (y_{rs}). Finalmente, a las acciones correctivas de control se les denota mediante (u_m) necesarias para conseguir una señal de referencia ó consigna (u_r).

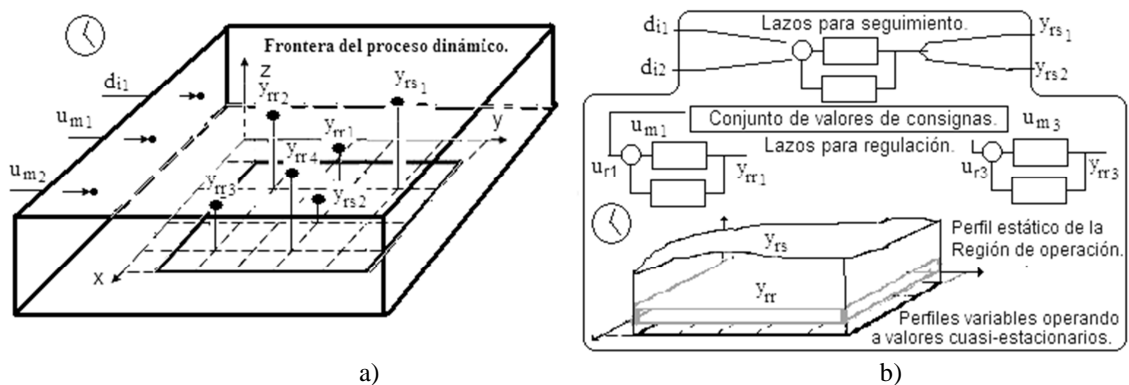


Figura I.- a) Fronteras para la supervisión y monitorización de variables reguladas y de seguimiento y b) Ejemplo de proceso con soluciones de control y seguimiento de la variable de carga.

La variable PD podrá representar cualquier proceso de tiempo continuo, dinámico, al cual se le regulan variables dentro de determinadas condiciones de tolerancia [8]. El conjunto de variables y_{rr} , acotan sus señales dentro de subconjuntos de valores de rango estrecho mientras que para las

variables y_{rs} , sus señales están cuantificadas dentro de un subconjunto de valores de rango amplio.

Tal y como se muestra en la Figura II, una variable de carga cualquiera d_{i1} puede tomar valores en la región comprendida entre un límite inferior y un valor nominal. En un proceso de producción continua se podrá desplazar entre diferentes estados cuasi-estacionarios, (Figura IIa), por ejemplo {A, B, C, D, E}, cada uno de los cuales es definido por el conjunto de valores centrados en un valor medio constante dentro de una tolerancia establecida (Figura IIb). Estos estados pueden ser estimados en tramas de series temporales a lo ancho de una ventana corta de tiempo, [9-11].

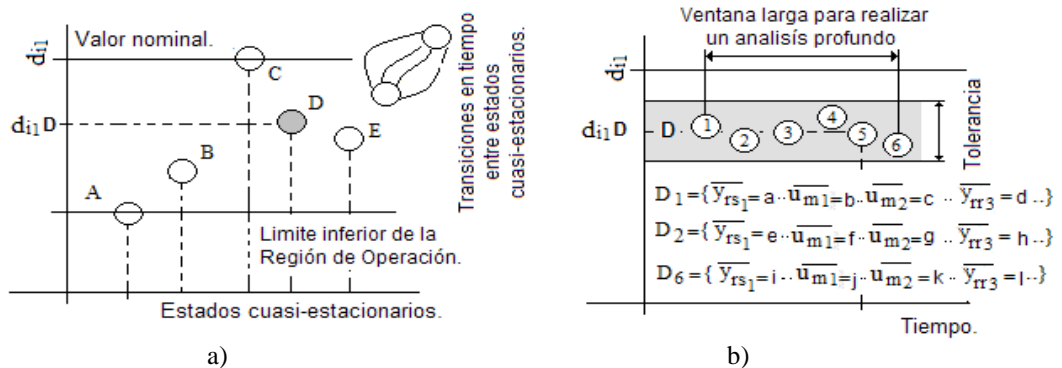


Figura II.- a) Conjunto de estados cuasi-estacionarios: su comportamiento multivariable y multidimensional en función de una variable de carga en ventana corta y b) Evolución del estado D a lo largo de una ventana larga.

1.2. La químico-métrica y la minería de datos (data-mining).- En los procesos industriales controlados, las series temporales asociadas a cada variable medida constituyen las fuentes de datos históricos a partir de las cuales se podrá caracterizar el rendimiento, detectar los cambios de parámetros y servir de base para diagnosticar sus causas. Para la caracterización, evaluación, diagnosis y prognosis de los procesos industriales, como por ejemplo aquellos de producción de energía, se requiere disponer de herramientas de cálculo para aplicar las técnicas de la químico-métrica (del inglés, Chemometrics). Bajo esta denominación se considera la ciencia de las mediciones [9] realizadas sobre cualquier sistema químico para caracterizar su estado vía la aplicación de métodos matemáticos o estadísticos. Por ende es una ciencia basada en análisis de datos.

La meta de la mayoría de las técnicas de la químico-métrica es derivar un modelo empírico a partir de los datos, que permita al investigador estimar una o más propiedades del sistema a partir de las mediciones [12]. La obtención de información útil a partir de bases de datos es un campo de investigación y aplicación interdisciplinar, que ha adquirido especial relevancia en los últimos 12-15 años. Intenta proponer soluciones al problema de cómo extraer información de grandes cantidades de datos. Diversos autores [13-15], han adoptado como básica la definición de *KDD* (Knowledge Discovery in Databases) ya que es el proceso no trivial de identificar a través de los datos, los patrones novedales, potencialmente útiles y entendibles. Se descompone en varias etapas:

- Definición del objetivo del análisis: Resulta crucial delimitar claramente el área de análisis a fin de minimizar el coste computacional.

- Selección de datos: Se hace de acuerdo con los objetivos propuestos; muchas veces se asocia a aspectos informáticos relacionados a cómo acceder y almacenar los datos [16].
- Pre-procesamiento de los datos: asegura la calidad de los datos en el sentido de que elimina ruidos aleatorios, outliers (datos atípicos o errores importantes) y manejo de datos ausentes o perdidos.
- Transformación de los datos: se refiere a cómo encontrar algún tipo de característica que ayude a mejorar la eficiencia y facilidad de identificación de patrones. Lo típico en esta etapa son los métodos de proyección y reducción de dimensionalidad de los datos.
- Minería de datos (*MD*): es el paso central del proceso *KDD* antes definido. La meta en esta etapa es identificar patrones bien definidos, válidos, novedosos, potencialmente útiles y significativos, de acuerdo con el objetivo del análisis.
- Interpretación y validación: se enfoca hacia la evaluación de los resultados del paso anterior.

Las señales correspondientes a las variables supervisadas de los procesos químicos portan ruidos y perturbaciones que están fuertemente auto-correlacionadas y son, en la mayoría de las plantas, de naturaleza no lineal. Las técnicas de monitorización de procesos que han sido ampliamente empleadas, tales como: el “Análisis de Componentes Principales” (*PCA*) y “Mínimos Cuadrados Parciales” (*PLS*) [17, 18], son definidas mediante modelos estáticos, asumiendo que las observaciones son independientes del tiempo y siguen una distribución Gausiana. Por otra parte, el “Análisis Canónico Variado” (*CVA*) [19], como herramienta de monitorización basada en el espacio de estado resulta más apropiada.

2. Objetivos y metodología.- Para investigaciones aplicadas basadas en datos que resulten, ya sean de experimentaciones de laboratorio o de mediciones industriales “in situ”, se requiere disponer de un software en una plataforma tal que soporte los cálculos computacionales de ingeniería necesarios como es el Matlab® [20] y que a su vez facilite: (i) la visualización multicanal con escalamiento, (ii) la selección de tramas con cursores y la creación de una base de datos secundaria con resultados calculados en las ventanas cortas. El objetivo del presente estudio es la monitorización de los diferentes *QSS* asociados al proceso de una central térmica, a fin de poder identificar fácilmente y diagnosticar posibles fallos ó malfuncionamiento de la misma. En este artículo se presenta una solución construida “ad-hoc” que se ha denominado “*IME*”, acrónimo en inglés de “Explorador Multi-variado Industrial” y se acomete un caso de estudio para demostrar sus prestaciones y grado de aplicabilidad sobre dicha central.

3. Desarrollo de la herramienta.- El *IME* es una aplicación abierta sobre Matlab® que ha surgido tanto con fines docentes como para la industria en el campo de la minería de datos de procesos termo-energéticos en sistemas complejos como son las centrales térmicas. Una manera de detectar anomalías es examinando la magnitud y la duración de aquellas variables que operan por fuera de umbrales prefijados. Un modo de operación que incurra en estos tipos de violaciones será con toda probabilidad causa de futuro mal funcionamiento y tal vez de serias averías. A su vez, con el transcurso del tiempo de operación, la planta sufre deterioros, cambios y deformaciones de materiales, etc., directamente asociados con su ciclo de vida útil y por lo tanto el conjunto de valores para el cual fue diseñado un determinado día (*D*), no tiene porqué ser exactamente igual que en fechas posteriores siendo éstos *D1*, *D2*, etc., funciones de los valores promedio de las variables previamente definidas.

En su núcleo presenta dos funcionalidades básicas; la visualización y la disponibilidad de selección de tramas en “ventanas cortas” (*STW*) a partir de “ventanas largas” (*LTW*) de series temporales. Es sobre los vectores existentes en la ventana corta con lo que queda abierta la

posibilidad de extender a otras posibles aplicaciones que se requieran ir incorporando. Con vistas a facilitar el diseño de algoritmos, se ha incluido en el *IME* la posibilidad de enlazar con un modelo Simulink (dentro de Matlab®) diseñado por el usuario y que le permita una fase de ensayo y validación previa.

El nuevo detector de estados estacionarios usa el cálculo de la desviación estándar de los parámetros de una forma recurrente, tal y como se muestra de forma esquemática en la Figura III.

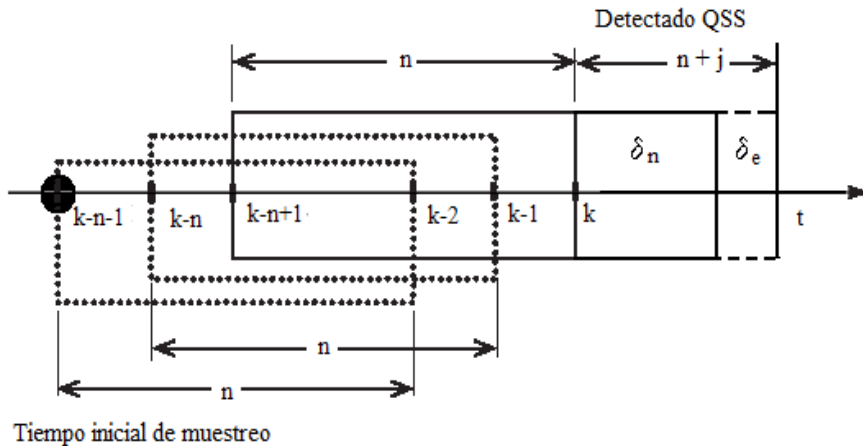


Figura III.- Nuevo algoritmo detector de QSS basado en ventanas móviles.

En esta figura, se muestra el desplazamiento de las ventanas móviles de tamaño n . El estado estacionario es detectado justo después del instante k de forma que el algoritmo sigue operando sobre la ventana inicial, para la cual se ha asignado una desviación estándar con umbral (δ_n), siendo (δ_e) el valor de la desviación estándar posterior.

3.1. Capacidades del IME.- Para aquellos procesos termo energéticos que tienen lugar en las centrales termoeléctricas, ya que, por ejemplo, como el generador de vapor opera bajo un régimen de transferencia de calor de modo distribuido [21], regularmente en régimen cuasi-estacionario, la supervisión a largo plazo, dígame en ventanas de tiempo largas, con asistencia del *IME* permitirá investigar sobre la distribución de estos estados a lo largo del tiempo. Así, mediante la determinación de modelos regresivos se podrá examinar los cambios paramétricos e implementar “a posteriori” métodos para la inferencia de sus posibles causas.

Tres elementos claves se formulan en la metodología de diseño para monitorizar datos de centrales térmicas. Estos son, visualización en múltiples canales de varias series temporales con normalización de escala, selección de tramas tanto de forma manual como automáticamente y pre-procesamiento de todos los vectores comprendidos entre los cursores para su análisis a diferentes intervalos de tiempo. Todo ello ha dado lugar al diseño de la herramienta *IME* cuyas capacidades se resumen a continuación, de forma que posteriormente se explica su modo de operación mostrándose por último un caso práctico de estudio.

El diseño del *IME*, cuyo esquema básico de trabajo se muestra en la Figura IV, posee actualmente las siguientes prestaciones:

- Visualizar sobre el mismo osciloscopio (objeto Axis de la programación grafica de Matlab®) hasta 8 vectores. Este tipo de dato ha sido previamente cargado

- sobre su espacio de trabajo (Ventana Workspace). Si el juego de datos dispone de un arreglo de celdas con las fechas y tiempo real absoluto, entonces la manipulación de estas series temporales están acuñadas con su tiempo real.
- Seleccionar a un subconjunto de elementos de los vectores largos delimitados entre dos cursores (según una ventana corta) que es capaz de posicionar el usuario sobre el gráfico.
 - Construir una Base de Datos Secundaria (*SDB*) a partir de una Base de Datos Primaria (*PDB*). En esta versión del *IME*, la *SDB* resulta de calcular los estadígrafos para cada trama seleccionada entre cursores. De este modo, la meta es estimar el conjunto de valores asociados a cada variable que caracteriza cada estado cuasi-estacionario del sistema dinámico bajo estudio. Los siguientes cinco comandos de la estadística descriptiva pueden ser aplicadas: “mean”, “std”, “range”, “min” y “max”.

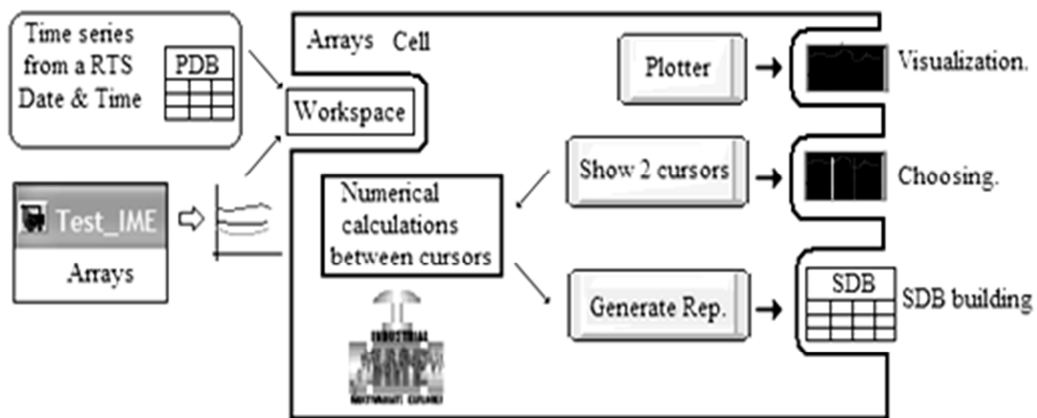


Figura IV.- Esquema simplificado de trabajo y prestaciones del IME.

3.2. Modo de operación.- Una vez que es ejecutado el programa mediante el comando “*IME*”, el diseño de su interfaz de usuario permite armonizar todo lo que éste necesita para trabajar y al mismo tiempo permite abrir el fichero correspondiente al modelo Simulink (que ha sido previamente diseñado y construido).

El *IME* puede trabajar con las dos siguientes fuentes de datos: (i) un conjunto de vectores unidimensionales que representan Series Temporales Reales (*RTS*) junto con un vector de celdas que contiene la pareja de valores fecha y tiempo (F , T) de cada muestra y (ii) un conjunto de vectores unidimensionales que resultan de la exportación de resultados durante un tiempo de cálculo de un modelo Simulink. En la Figura V se visualizan a modo de ejemplo, variables industriales reales exportadas desde una base de datos, mostrándose en la gráfica la variación de su amplitud.

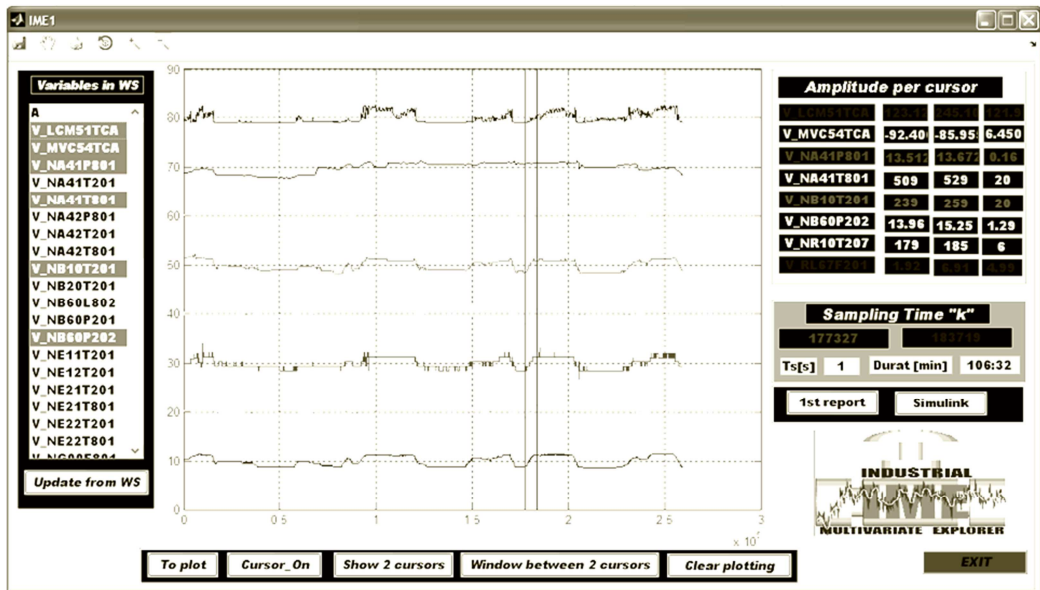


Figura V.- Variables reales de un generador de vapor de una central térmica.

Del total de las señales exportadas del registro histórico actualmente existente en el espacio de trabajo (ventana *Variables in WS*), en la ventana *Amplitude per cursor*, se pueden seleccionar para visualizar a la vez hasta 8 de ellas tal y como se muestra en la primera columna, de forma que sus respectivos valores de amplitud se muestran en la segunda y tercera columnas respectivamente según el intervalo marcado por los dos cursores (representados por las dos líneas verticales situadas en este ejemplo en el centro de la gráfica). En la cuarta columna se muestra la diferencia de amplitud entre cada uno de ellos respectivamente. Asimismo debajo en la ventana *Sampling Time "k"*, se muestra el instante de tiempo en que cada uno de ellos ha sido posicionado y la duración correspondiente (en formato de minutos: segundos) ya que se toma como base de cálculo que la unidad de muestreo es el segundo.

En la Tabla I se explica el significado junto con las unidades de esas ocho variables escogidas de forma genérica que nos da una idea de la gran variedad de datos que es capaz de tratar el sistema.

| Variable | Significado | Unidad |
|----------|--|--------|
| LCM51TCA | Potencia activa en demanda | MW |
| MVC54TCA | Presión de vacío en condensador | kPa |
| NA41P801 | Presión del vapor salida sobrecalentador | MPa |
| NA41T801 | Temperatura del vapor salida sobrecalentador | °C |
| NB10T201 | Temperatura a la salida del economizador | °C |
| NB60P202 | Presión del domo | MPa |
| NR10T207 | Temperatura gases salida CAR | °C |
| RL67F201 | Flujo de agua de atemperamiento | Ton/h |

Tabla I.- Significado de las variables reales mostradas en la Figura V.

Para la visualización se usan los botones situados en la parte inferior. Así, *To plot* dibuja sobre una gráfica temporal las señales de las variables seleccionadas mientras que *Clear plotting* las borra del objeto axis. *Cursor_on* se usa para situar en secuencia el primer y segundo cursor y *Show 2 cursors* para fijar las coordenadas de cada uno de ellos y determinar así los valores de

amplitud y tiempo de cada una de las variables existentes en el espacio de trabajo. De todas ellas sólo se muestran las que fueron seleccionadas. El comando *Window between 2 cursors* crea nuevos vectores para las variables seleccionadas y le antepone la etiqueta “w”, facilitando así el modelado dinámico.

El botón *Ist report* conduce al usuario: (i) a la interfaz de cálculo (sobre los vectores dentro de la ventana corta) y (ii) a la funcionalidad de crear la base de datos secundaria mediante hoja Excel. Por último el botón *Simulink* da paso a la apertura de la aplicación. La figura VI muestra las ventanas que se abren a pulsar estos dos botones. Así, la Figura VIa muestra la operatividad sobre la planta industrial para la aplicación de los conceptos de tratamiento estadístico sobre variables reales y la figura VIb nos muestra un detalle de la generación de la hoja Excel correspondiente, también con variables reales y por último la Figura VIc nos muestra el interfaz de conectividad con el Simulink para proceder al análisis pero en este caso con las variables simuladas tal y como se ha comentado anteriormente.

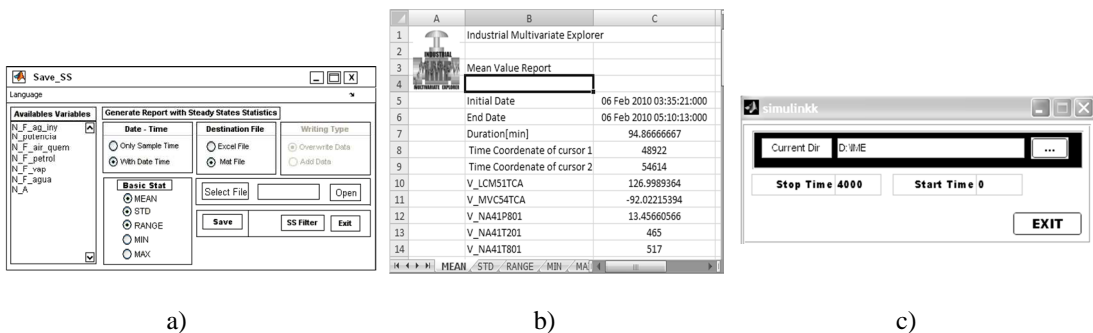


Figura VI.- a) Interfaz para enlace con fichero Excel para cálculo y b) detalle de la hoja Excel y c) Interfaz de conectividad con el modelo Simulink

La figura VII nos muestra la estructura genérica del modelo Simulink construido en Matlab®. Con él se pueden generar registros históricos de características similares a las de las señales reales mostradas anteriormente. Este recurso permite ensayar los algoritmos y métodos de detección de estados estacionarios antes de someterlos a registros industriales. Indudablemente, por la naturaleza tan lenta con que se degradan los procesos de los ciclos térmicos es necesario disponer de una herramienta informática que sea capaz de discretizar los largos registros históricos, de cada variable seleccionada. Los parámetros de configuración en este caso son: tiempo de cálculo de 4000 s y método ode4 (Runge-Kutta).

4. Aplicación a un caso-estudio.- A continuación se muestra la aplicación del *IME* a un caso práctico. La presente metodología así como las tareas de cálculo se han aplicado al generador de vapor de una central termoeléctrica. La planta está formada por dos unidades idénticas de una potencia unitaria de *250 MWe*. Está equipado con un sobrecalentador y un recalentador de dos etapas, economizador (*ECO*) y dos calentadores de aire regenerativos (*CAR*), siguiendo el ciclo de Rankine regenerativo. El flujo de vapor es de *215.5 kg/s* (máximo), la presión de vapor de referencia es de *13.9 MPa* y la temperatura del sobrecalentador de *525°C (798 K)* con una tolerancia de $\pm 8 K$.

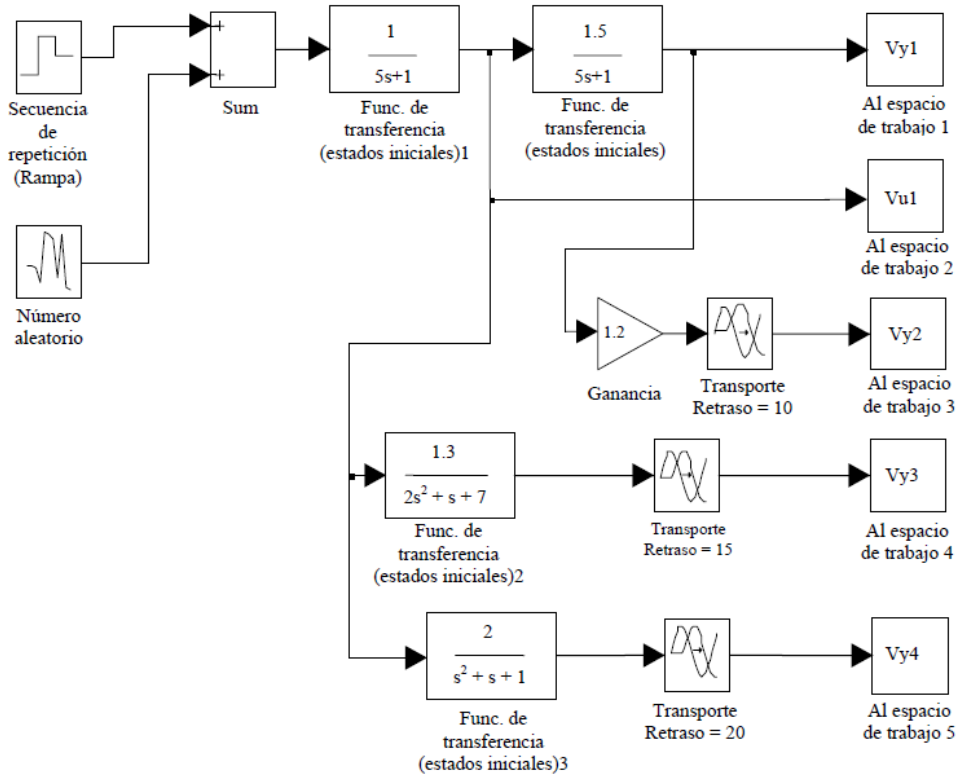


Figura VII.- Flow chart del modelo Simulink genérico para estudio con el IME.

En la Tabla II se explica el significado de las ocho variables escogidas para el caso-estudio, de forma análoga a como se hizo anteriormente. Se trata principalmente de temperaturas en distintas partes críticas del generador y una variable de presión del vapor.

| Variable | Significado | Unidad |
|----------|---|--------|
| RL50T202 | Temperatura agua de alimentación del ECO | °C |
| PCM51TCA | Presión de vapor sobrecalentado | MPa |
| NA41T801 | Temperatura vapor salida sobrecalentador 4 izq. | °C |
| NA42T801 | Temperatura vapor salida sobrecalentador 4 der. | °C |
| NE21T801 | Temperatura vapor salida recalentador 2 izq. | °C |
| NE22T801 | Temperatura vapor salida recalentador 2 der. | °C |
| NR10T207 | Temperatura gases postcombustión CAR izq. | °C |
| NR20T207 | Temperatura gases postcombustión CAR der. | °C |

Tabla II.- Definición de las variables del caso estudio.

La Figura VIII muestra la evolución de estas señales generadas sobre el espacio de trabajo para este caso-estudio. Estas medidas son registros históricos. El tiempo base (T) de la muestra es de un segundo. El archivo contiene exactamente 345.601 muestras de cada variable. El trazo grueso en cada una de las figuras representa a todos y cada uno del total de períodos de estado estacionario que detectó el filtro para la tarea de descomposición de la muestra continua.

Se puede observar que un primer grupo de variables, como son: presión de vapor sobrecalentado, temperaturas vapor salida sobrecalentador y temperaturas vapor salida recalentador, oscilan en un rango estrecho mientras que un segundo grupo de variables, como son: temperatura agua de alimentación del economizador y las temperaturas de los gases de postcombustión en el calentador de aire regenerativo lo hacen en un rango amplio. En efecto, el primer grupo, corresponde a los parámetros de calidad del ciclo de Rankine regenerativo. Entre las exigencias del sistema de control de una central térmica, para los subprocesos de sobrecalentamiento y recalentamiento, se encuentra la regulación de estas variables mediante la cantidad de energía térmica que se le transfiere [22]. En cambio las del segundo grupo, dependen del valor de la potencia generada [23].

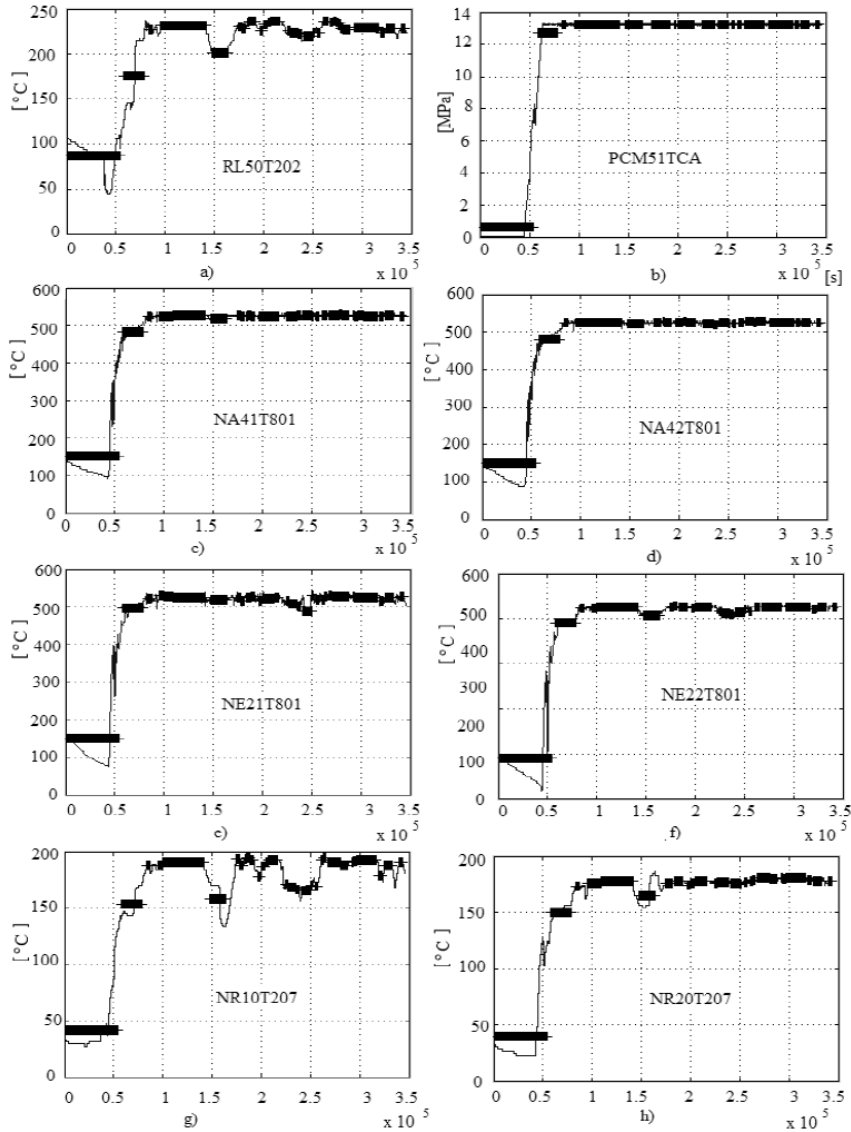


Figura VIII.- Evolución de las variables en el generador de vapor para el caso estudio con detección de los QSS.

En efecto, con una solución como el diseño aquí presentado, las largas series de tiempo se transforman en una sucesión de valores medios estabilizados, asociados a los segmentos de estados estacionarios que visualmente fueron detectados, dotándolos además de su respectiva información de fecha y tiempo. Todo ello representa sin duda la base del futuro de la diagnosis en centrales térmicas.

5. Conclusiones.- El *IME* es una aplicación abierta que facilita la visualización multicanal con un elemento clave como es la delimitación de la ventana corta, bajo alguna condición preestablecida. Este artículo muestra como esta herramienta informática puede ayudar a un operador experto de centrales a localizar las mínimas variaciones de las señales que representan a las distintas variables, de modo tal que el proceso no exhiba tendencia y por ende se encuentre en un estado cuasi-estacionario. Las perspectivas del *IME* están enmarcadas en los objetivos que se planteen dentro de los conceptos de ventanas corta y larga de procesos industriales sometidos a cambios paramétricos dentro de las variadas “toolboxes” que ofrece el paquete Matlab®.

Así, en base al análisis realizado se puede concluir que:

- A. Mediante esta aplicación se facilita notablemente la exploración y extracción de información de procesos industriales, en especial los termo-energéticos a partir de las señales asociadas a sus variables.
- B. Una vez visualizado un registro largo, la detección de tramas, correspondientes a estados de operación cuasi-estacionarios, en ventanas de tiempo cortas permitirá caracterizarlos y a su vez, construir una base de datos secundaria, portadora de largos periodos de trabajo y sometidos a diferentes regímenes que propiciarán el correcto diagnóstico de la operación para la posterior aplicación de técnicas de planificación de mantenimientos preventivos.
- C. El estudio de las variables de proceso seleccionadas en este trabajo han servido para mostrar claramente las posibilidades y beneficios que ofrece esta metodología, que se ha mostrado como una potente herramienta de diagnóstico y supervisión al servicio de la operación de la central. Además, al ser un código abierto, permite la incorporación de futuras aplicaciones como herramientas de optimización, mejoras en visualización, etc.
- D. El procedimiento aquí propuesto además representa un puente de colaboración efectiva entre los gestores de operación de centrales térmicas tanto convencionales como de ciclo combinado y aquellos con formación en procesamiento de datos y señales, de forma que el enfoque de esta contribución facilita la integración de conceptos termoenergéticos con los principios de la regulación automática.

6. Nomenclatura.

| | |
|-----------------|---|
| d_i | Señales de carga ó perturbación. |
| k | Muestra inicial para cada “n”. |
| n | Tamaño de ventana inicial. |
| u_r | Señales de referencia ó consigna. |
| u_m | Señales de control. |
| y_{rs} | Señales de salida de variables en seguimiento. |
| y_{rr} | Señales de salida de variables reguladas. |
| δ_n | Desviación estándar de la condición en “n”. |
| δ_c | Desviación estándar de la condición después de “n”. |
| $A, B, C, D...$ | Diferentes estados cuasi-estacionarios. |
| <i>CAR</i> | Calentador de aire regenerativo. |
| <i>CHP</i> | Cilindro de alta presión. |

| | |
|-------------------|--|
| <i>CVA</i> | Análisis Canónico Variado. |
| D_1, D_2, \dots | Valores promediados sobre ventana larga. |
| <i>DCS</i> | Sistemas de Control Distribuido. |
| <i>ECO</i> | Economizador. |
| <i>F</i> | Fecha (dd/mm/aaaa). |
| <i>IME</i> | Explorador Multi-variado Industrial. |
| <i>KDD</i> | Obtención de información sobre bases de datos. |
| <i>LTW</i> | Ventana larga. |
| <i>MD</i> | Minería de datos. |
| <i>PCA</i> | Análisis de Componentes Principales. |
| <i>PDB</i> | Base de Datos Primaria. |
| <i>PLS</i> | Análisis de Mínimos Cuadrados Parciales. |
| P_D | Proceso dinámico controlado. |
| <i>QSS</i> | Estados Cuasi-Estacionarios. |
| <i>RTS</i> | Series Temporales Reales. |
| <i>SDB</i> | Base de Datos Secundaria. |
| <i>STW</i> | Ventana corta. |
| <i>T</i> | Tempo (s). |
| <i>WS</i> | Espacio de trabajo. |

7. Referencias.

- [1] A. Creus, Instrumentación Industrial. Santa Fe de Bogota: Alfaomega, 1999.
- [2] S. Nihau, K. P. R. Vilankar and R. Rhinehart, "Type-II critical values for a steady-state identifier," *Journal of Process Control*, vol. 20, n° 7, pp. 885-890, 2010.
- [3] J. Finn, J. Wagner and H. Bassily, "Monitoring strategies for a combined cycle electric power generator," *Applied Energy*, vol. 87, n° 8, pp. 2621-2627, 2010.
- [4] J. Ballester and T. Garcia-Armingol, "Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, n° 4, pp. 375-411, 2010.
- [5] X. Z. Wang, "Knowledge discovery through mining process operational data, application of neural networks and other learning technologies," *Process Engineering*, pp. 287-327, 2001.
- [6] J. F. Macgregor, "Data-Based Latent Variable Methods for Process Analysis, Monitoring and Control," presented at the European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 14, Lisbon, 2004.
- [7] P. V. R. Carvalho, I. L. Dos Santos and M. R. S. Borges, "Micro incident analysis framework to assess safety and resilience in the operation of safe critical systems: a case study in a nuclear power plant," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, n° 21, pp. 277-286, 2008.
- [8] M. R. Mano, R. Rengaswamy and A. Venkatasubramanian, "A signed directed graph-based systematic framework for steady-state malfunction diagnosis inside control loops," *Chemical Engineering Science*, vol. 61, n° 6, pp. 1790-1810, 2006.
- [9] M. W. Barry and N. B. Gallagher, "The process chemometrics approach monitoring and fault detection," *J. Proc. Cont.*, vol. 6, n° 6, pp. 329-348, 1996.
- [10] K. J. Cios, W. Pedrycz and R. W. Swiniarski, *Data mining methods for knowledge discovery*. Boston: Kluwer Academic, 1998.
- [11] J. Han and M. Kamber, *Data mining: concepts and techniques*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001.

- [12] S. Uson, A. Valero and L. Correas, "Energy efficiency assessment and improvement in energy intensive systems through thermoeconomic diagnosis of the operation," *Applied Energy*, vol. 87, n° 6, pp. 1989-1995, 2010.
- [13] Hand D, H. Mannila and P. Smyth, *Principles of Data Mining*. Cambridge: MIT Press, 2001.
- [14] C. Apte, B. Liu, E. P. D. Pednault and P. Smyth "Business Applications of Data Mining. *Communications of the ACM*, vol. 45, n° 8, pp.49-53, 2008.
- [15] U. M. Fayyad, G. Piatesky-Shapiro and P. Smyth, "From Data Mining to Knowledge Discovery: an overview," in *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Menlo Park, Calif.: AAAI/MIT Press, 1996, pp. 1-34.
- [16] M. Schladt and B. Hui, "Soft sensors on nonlinear steady-state data reconciliation in the process industry," *Chemical Engineering and Processing*, n° 46, pp. 1107-1115, 2007.
- [17] M. Kano, S. Hasebe, I. Hashimoto and H. Ohno, "A new multivariate statistical process monitoring method using principal component analysis," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 25, n° 7-8, pp. 1103-1113, 2001.
- [18] J. F. MacGregor, "Data-based latent variable methods for process analysis, monitoring and control," presented at the 37th. European Symposium of the Working Party on Computer-Aided Process Engineering, n° 18, pp. 87-98, 2004.
- [19] P. Odiowei and Y. Cao, "Nonlinear dynamic process monitoring using canonical variate analysis and kernel density estimations, industrial informatics," *IEEE Transactions*, vol. 6, n° 1, pp. 36-45, 2011.
- [20] MATLAB/SIMULINK, <http://www.mathworks.com>, 2008.
- [21] J. M. Blanco and F. Peña, "Analytical study of the effects of the clogging of a mechanical precipitator unit in air preheaters in a high-performance thermoelectric power plant based on available data," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 130, n° 2, pp. 22001-22007, 2008.
- [22] C. Poma, V. Verda and S. Consonni "Design and performance evaluation of a waste-to-energy plant integrated with a combined cycle," *Energy*, n° 35, pp. 786-793, 2010.
- [23] J. M. Blanco and F. Peña "Optimizing preliminary design of industrial equipment involving different thermal engineering calculation procedures over a power plant", in *Thermal engineering research developments*. New York: Nova Science Publishers, 2010, ch. 1.