



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE CONTROL AUTOMÁTICO

**LA DETECCIÓN DE ESTADOS ESTACIONARIOS Y SU
APLICACIÓN A LA MONITORIZACIÓN DE GENERADORES
DE VAPOR DE TERMOELÉCTRICAS**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

LUIS VÁZQUEZ SEISDEDOS

Santiago de Cuba

2015



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE CONTROL AUTOMÁTICO

**LA DETECCIÓN DE ESTADOS ESTACIONARIOS Y SU
APLICACIÓN A LA MONITORIZACIÓN DE GENERADORES
DE VAPOR DE TERMOELÉCTRICAS**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

Autor: Prof. Auxiliar, Ing. Luis Vázquez Seisdedos, M.Sc.
Tutor: Prof. Titular, Ing. Yolanda Eugenia Llosas Albuerne, Dr. C.
Prof. Titular, Lic. Rafael Arturo Trujillo Codorniu, Dr. C.

Santiago de Cuba

2015

AGRADECIMIENTOS

En este tipo de investigación realizada con las grandes limitaciones que tengo en la Universidad de Oriente para el acceso a internet y a bases de datos científicas entre otras dificultades, realmente es un gran reto y se necesita mucha fuerza de voluntad para enfrentarse a tantas, disímiles y en ocasiones inesperadas adversidades. Agradezco a nuestro Dios, dotarme de fuerzas de voluntad, de abrirme caminos y a la política de igualdad de oportunidades en la instrucción cubana.

A mi esposa Clarita quien me ha apoyado para que priorice la investigación por sobre todas mis responsabilidades, compulsarme a que resista y siempre ayudarme a sobre ponerme a todas las dificultades.

A mis familiares cercanos, padres, hijos (incluyendo a mi sobrina Yoa) y hermano.

A mi tutora Yolanda por el apoyo de las investigaciones del sector energético y su permanente optimismo. A mi tutor Rafael Arturo por su gran capacidad de conducción científica y paciencia para adecuar su gran inteligencia con una modestia meritoria.

A los oponentes y miembros del tribunal del acto de predefensa, los doctores Chang, Ángulo y Cano (UO), muy en particular: Alberto (ISPJAE), José Ramón (ICIMAF), Izaguirre (UCLV) y Ania (UO), por sus valiosísimas preguntas, señalamientos y recomendaciones.

A Joseba Quevedo Casin, PhD, Catedrático del Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Cataluña por dedicarme su tiempo y experiencia realizándome valiosas sugerencias.

Al profesor alemán PhD Detlef Proske quien en el 2001 me demostró la importancia de las investigaciones del sector energético de cualquier país. Al profesor belga PhD René Boel quien en el 2005 me motivo por la estructura jerárquica del control de un sistema de suministro eléctrico. A Yrjö Majanne, vicepresidente para el área de generación del comité técnico 6.3 del IFAC dedicado a sistemas de potencia y de energía, por el fructífero intercambio y asesoría desde el 2010. A Jeffrey Dean Kelly jefe de tecnología y cofundador de la compañía Algoritmos Industriales (LLC) quien desde el 2013 ha sido mi permanente consultante sobre detección de estados estacionarios en procesos industriales. A los profesores de la Universidad del País Vasco Jesús M. Blanco y Francisco Peña por su valiosa asesoría sobre las centrales térmicas. A los Doctores Yoseba Peña y Cruz Borges y al Ing. Aitor Peña, del Laboratorio de Energía de la Universidad de Deusto por su apoyo permanente desde el 2010. Al Profesor Francisco Romero de la Politécnica de Valencia por su apoyo permanente desde el 2006.

A John Palcic quien durante más de 10 años ha sido mi internet remota a cualquier día y cualquier hora. A Susan Morrison por su asesoría en las traducciones del español para el inglés en búsqueda de nuevas oportunidades.

A los amigos Alvaro, José Manuel, David, Rolo, mis compañeros del DEPCA y en particular a Tur (epd), Pepe Acosta (epd) y Basilio. A muchos expertos anónimos de las Termoeléctricas cubanas: Renté, Felton, Nuevitas y Santa Cruz, a los cuales debo mucho en la integralidad actual de mi formación en este campo.

DEDICATORIA

A todos los motivados e interesados en las investigaciones aplicadas relacionadas al mejoramiento de los sistemas de producción de energía para beneficio y calidad de vida de los seres humanos.

PENSAMIENTOS

En lugar de ser un hombre de éxito, busca ser un hombre valioso: lo demás llegará naturalmente.

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad

Albert Einstein

SÍNTESIS

La detección adecuada de los intervalos de tiempo en los que opera un proceso industrial automatizado en estados estacionarios es crucial para la aproximación certera de sus muestras a los valores que requieren los modelos y procedimientos para su monitorización y optimización.

La investigación está dedicada a la detección de estados estacionarios y aplicar sus resultados a la monitorización del desempeño de la operación. En tal sentido, en esta tesis se ofrece:

(i) Un método nuevo para la detección de estados estacionarios a cada serie temporal, robusto ante ruido contaminante auto-correlacionado de distribución normal al combinar el cálculo de estadígrafo de dispersión con la extracción de tendencia, y un algoritmo que determina los intervalos coincidentes entre múltiples variables.

(ii) Un procedimiento nuevo, que integrando interdisciplinariamente el análisis estadístico, de la modelación matemática, la dinámica de sistemas complejos, el procesamiento digital de señales, la termotecnia y la experiencia industrial, brinda una alternativa a la falta de precedencia de establecer los pasos y criterios para el diseño y explotación de sistemas de monitorización del desempeño en la operación del generador de vapor en la unidad de generación conectada a sistema eléctrico sometida a los efectos de acciones perturbadoras ininterrumpidas de lento desarrollo.

Palabras Clave:

Detección de estado estacionario, monitorización de procesos industriales, interpolación de datos, generador de vapor, serie temporal.

Listado de abreviaturas

ANOVA: **AN**alysis **O**f **V**ariance
ARMA: **A**uto **R**egressive **M**oving **A**verage
ASME: **A**merican **S**ociety of **M**echanical **E**ngineers
BAA: **B**omba de **A**gua de **A**limentación
BDP: **B**ase de **D**atos **P**rimaria
BDS: **B**ase de **D**atos **S**ecundaria
BDR: **B**ase de **D**atos **R**educida
CAP: **C**alentadores de **A**lta **P**resión
CAR: **C**alentador de **A**ire **R**egenerativo
CBP: **C**alentadores de **B**aja **P**resión
CDC: **C**entro de **D**espacho de **C**arga
CTE: **C**entral **T**ermo **E**létrica
DC: **D**etector de **C**oincidencias
DEE: **D**etección de **E**stado **E**stacionario
DEG: **D**etección de **E**rrores **G**ruesos
DEPCA: **D**E**P**artamento de **C**ontrol **A**utomático
DET: **D**etección de **E**stado **T**ransitorio
DWT: **D**iscrete **W**avelet **T**ransform
EE: **E**stado **E**stacionario
EPI: **E**xplorador de **P**rocesos **I**ndustriales
ET: **E**stado **T**ransitorio
ECO: **E**C**O**nomizador
FAC: **F**unción de **A**uto-**C**orrelación
GE: **G**enerador **E**létrico
GV: **G**enerador de **V**apor
ICIMAF: **I**nstituto de **C**Ibernética **M**atemática y **F**ísica
IEC: **I**nternational **E**lectrotechnical **C**ommission
IEEE: **I**nstitute of **E**lectrical and **E**lectronic **E**ngineers
IFAC: **I**nternational **F**ederation of **A**utomatic **C**ontrol
ISPJAE: **I**nstituto **S**uperior **P**olitécnico **J**osé **A**ntonio **E**cheverría
IME: **I**ndustrial **M**ulti-variate **E**xplorer
LLC: **L**imited **L**iability **C**ompany
MAD: **M**edian **A**bsolute **D**eviation
MATLAB: **M**A**T**rix **L**A**B**oratory
MPC: **M**odel **P**redictive **C**ontrol
MRBD: **M**odelo de **R**referencia de **B**uen **D**esempeño
OSRI: **O**ficina de **S**eguridad de **R**edes **I**nformáticas
PCA: **P**re-**C**alentadores de **A**ire
PID: **P**roportional **I**ntegral **D**erivative
PP: **P**ower **P**lants
PS: **P**ower **S**ystems
PSD: **P**ower **S**pectral **D**ensity
PSNR: **P**eak **S**ignal-to-**N**oise **R**atio
PTC: **P**erformance **T**est **C**odes
QRS: **Q**ualitative **R**epresentation of **S**ignals
RB: **R**uido **B**lanco

RC: **R**uido **C**oloreado
RD: **R**econciliación de **D**atos.
RH: **R**e-Calentador (**H** de Heater)
RTO: **R**eal **T**ime **O**peration
SC: **S**obre-Calentador
SCADA: **S**upervisory **C**ontrol **A**nd **D**ata **A**cquisition
SE: **S**istema **E**léctrico
SESTLMACE: **S**lovenske **E**nergeticke **S**trojarne (en Checo)
VC: **V**ariable **C**ontrolada
VCP: **V**entana de **C**orto **P**lazo
VLP: **V**entana a **L**argo **P**lazo
VM: **V**ariables **M**anipulada
VP: **V**ariable de **P**roceso
VRG: **V**entilador de **R**ecirculación de **G**ases
VTF: **V**entilador de **T**iro **F**orzado
VTI: **V**entilador de **T**iro **I**nducido
UCLV: **U**niversidad **C**entral de **L**as **V**illas
UO: **U**niversidad de **O**riente
UGE: **U**nidad de **G**eneración **E**léctrica

ÍNDICE	Pág
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
PENSAMIENTOS	iii
SÍNTESIS	iv
Listado de abreviaturas	v
Listado de tablas	xi
Listado de figuras.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos específicos:	5
Aportes y novedad	7
Organización de la tesis	8
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA LA DETECCIÓN DE ESTADOS ESTACIONARIOS.....	10
1.1 El control de planta completa	10
1.2 La dinámica de los procesos, las mediciones y el registro industrial	11
1.2.1 El muestreo de las variables de proceso	11
1.2.2 El registro industrial.....	12
1.2.3 Las mediciones industriales en plantas controladas	13
1.2.4 El ruido	14
1.2.5 La tendencia	16
1.3 La detección de estados estacionarios	16
1.4 Registro de potencia de unidad de generación interconectada a sistema eléctrico.....	17
1.5 Detección de estados estacionarios: técnicas existentes y su análisis crítico. 19	19
1.6 Evaluación de los métodos: Criterio cuantitativo y técnicas estadísticas.....	24
Conclusiones del capítulo	26

2. EL PROCESO: FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y PRÁCTICOS PARA LA MONITORIZACIÓN	27
2.1 La jerarquía de control en el sistema eléctrico	28
2.2 La Unidad de Generación Eléctrica	29
2.2.1 El ciclo térmico y el generador de vapor	30
2.2.2 Caracterización de los tiempos de respuestas en la generación de vapor .	31
2.2.3 Lazos de control en la generación de vapor.....	32
2.3 Clasificación de las variables.....	34
2.4 Clasificación de las perturbaciones en control de planta completa	37
2.5 Monitorización: Curva de buen desempeño relativo y ventanas	38
Conclusiones del capítulo	41
3. MÉTODO PARA LA DETECCIÓN DE ESTADOS ESTACIONARIOS Y PROCEDIMIENTO PARA SU APLICACIÓN EN LA MONITORIZACIÓN	42
3.1 El método para la detección de estados estacionarios	42
3.2 Condición necesaria para la varianza de un segmento en estado estacionario	44
3.2.1 Condición necesaria para el caso de contaminación con ruido blanco	44
3.2.2 Condición necesaria para el caso de contaminación con ruido coloreado	48
3.2.3 Criterios de selección basados en características de respuesta temporal.....	52
3.3 Estimación de la varianza del ruido	53
3.3.1 Selección del estimador de varianza del ruido: análisis comparativo	55
3.4 Algoritmo para segmentación	58
3.5 Algoritmo para rectificación de coordenadas y verificación de tolerancia	59
3.6 Detector de coincidencias	60
3.7 Aspectos para evaluar un método y verificar un algoritmo de detección de coincidencia	62
3.8 Procedimiento para la monitorización del desempeño de la operación.....	62
3.9 Criterio de selección de variables	64
3.10 Detección y agrupamiento de desviaciones	64
3.10.1 Estructura de curva de buen desempeño relativo.....	65
3.10.2 Construcción de la curva de buen desempeño	66
3.10.3 Cálculo de las desviaciones	67
3.10.4 Algoritmos para la detección de desviaciones y su agrupamiento	68
Conclusiones del capítulo	70
4. EVALUACIÓN DEL MÉTODO Y APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO. .	71
4.1 Plataforma de experimentación para la evaluación comparativa del método..	71

4.1.1 Definición de las señales bases	72
4.1.2 Generación de las señales de ensayo	73
4.1.3 Configuración de los algoritmos.....	74
4.2 Comparación de los métodos.....	75
4.3 Ejemplo de aplicación de los métodos a registro industrial: procedimiento para análisis comparativo	79
4.4 Verificación del algoritmo de detección de coincidencia.....	81
4.5 Presentación del contexto de experimentación.....	81
4.6 Sobrecalentador simulado de la Central Termoeléctrica de Detmarovice.....	82
4.7 Generador de vapor de la Central Termoeléctrica de Felton.....	83
4.7.1 Aplicación del procedimiento en un generador de vapor: Monitorización del desempeño global.....	84
4.7.2 Aplicación del procedimiento en un generador de vapor: Monitorización del ensuciamiento en el CAR.....	87
Conclusiones del capítulo	92
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES.....	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXO A: FUNDAMENTO DEL MÉTODO DE RHINEHART	107
ANEXO B: FUNDAMENTO DEL MÉTODO DE KELLY Y HEDENGREN	109
ANEXO C: FUNDAMENTO DEL MÉTODO DE KIM.....	111
ANEXO D: CÓDIGOS EN MATLAB	112
D.1 Segmentación.....	112
D.2 Rectificación de coordenadas de segmentos candidatos.....	112
D.3 Verificación de la tolerancia de la media del segmento	113
D.4 Determinación de coincidencias	113
D.5 Detección de desviaciones	114
D.6 Agrupación de desviaciones	114
D.7 Estimación de la varianza del ruido en las mediciones.....	115
D.8 Extracción de tendencia mediante media móvil	116
D.9 Estimación del factor de auto-correlación γ	116
D.10 Método de Detección de Estado Estacionario RTest.....	116
D.11 Método de Detección de Estado Estacionario JTest	117
D.12 Determinación de los errores Tipo I y II.....	118

ANEXO E: CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE VARIABLES	119
ANEXO F: GENERADOR DE VAPOR DE LA UNIDAD DOS	122
ANEXO G: CASO DE ESTUDIO EN LA REVISTA ENERGY, 2012.....	127
ANEXO H: CASO DE ESTUDIO DE LA REVISTA APPLIED ENERGY, 2013	129
ANEXO I: DATOS EXPERIMENTALES EN MONITORIZACIÓN DE ENSUCIAMIENTO DE SUPERFICIES.....	130

Listado de tablas

Tabla 1.1: Decodificación del resultado de la DEE por muestra.....	25
Tabla 2.1: Lazos del generador de vapor	33
Tabla 2.2: Clasificación de las variables en la generación de vapor	35
Tabla 3.1: Desviaciones de los estimadores ante RB	56
Tabla 3.2: Desviaciones de los estimadores ante RC	57
Tabla 3.3: Resultados de prueba de significación estadística con técnica ANOVA	57
Tabla 4.1: Errores promedio de exponencial (exp.) con RB	76
Tabla 4.2: Errores promedio de exponencial (exp.) con RC	76
Tabla 4.3: Errores promedio de trapezoidal (trap.) con RB.....	77
Tabla 4.4: Errores promedio de trapezoidal (trap.) con RC.....	77
Tabla 4.5: Errores en la DEE	80
Tabla 4.6: Efecto de los cambios en α_{s2} sobre M_{wr}	83
Tabla 4.7: Resultados por VP de la DEE en un EE	86

Listado de figuras

Figura 1.1: Representación de señales: a) analógica, b) efecto del ruido	13
Figura 1.2: Esquema para contaminar con ruido coloreado	15
Figura 1.3: Registros de potencia de dos regímenes de operación	17
Figura 1.4: Histograma de los segmentos de EE de la figura 1.3a	18
Figura 1.5: Histograma de los segmentos de EE de la figura 1.3b	18
Figura 2.1: La DEE en la monitorización de la UGE	27
Figura 2.2: Modelo de la operación: a) en tiempo continuo, b) de eventos discretos	29
Figura 2.3: Operación en VLP: a) de amplio rango, b) agrupamientos	39
Figura 3.1: Método Sigma - Gamma	43
Figura 3.2: Criterio de selección de ancho de ventana ante RB	46
Figura 3.3: Criterio de selección de ancho de ventana ante RC	51
Figura 3.4: Rectificación de coordenadas al comienzo de la detección	52
Figura 3.5: Rectificación de coordenadas al final de la detección.....	52
Figura 3.6: Esquema de cómputo para la monitorización a largo plazo.....	63
Figura 4.1: Serie temporal exponencial	72
Figura 4.2: Serie temporal trapezoidal.....	72
Figura 4.3: Ejemplos de funciones de auto-correlación de ruidos sintéticos.....	74
Figura 4.4: Errores promedio totales: a) exp. RB, b) exp. RC, c) trap. RB, d) trap. RC	78
Figura 4.5: Detección manual de segmentos de EE.....	79
Figura 4.6: Función de auto-correlación del ruido de registro industrial	80
Figura 4.7: Secuencias de segmentos en EE y ET: a) irregular y b) regular	81
Figura 4.8: Valores de EE y sus valores de referencias normativas	85
Figura 4.9: Relaciones normativas: a) de evaporación y b) de estequiometría	85
Figura 4.10: Ejemplo de experimentación a largo plazo	89
Figura 4.11: Presión del lado de gases: a) del horno y b) a la entrada del CAR	89
Figura 4.12: Temperaturas en el CAR: a) aire de entrada y b) en gases de salida	90
Figura 4.13: Apertura de compuertas: a) del VRG y b) del VTF	90
Figura 4.14: Combustión: a) flujo de combustible, b) flujo de vapor	90
Figura 4.15: a) Temperatura de gases, b) presión de vapor	91
Figura 4.16: Temperatura de vapor: a) sobrecalentado, b) recalentado.....	91
Figura 4.17: Relaciones normativas: a) estequiometría y b) evaporación	91

INTRODUCCIÓN

En la estructura jerárquica de control de planta completa (Plantwide Control) que opera en tiempo real, la detección de estados estacionarios (DEE) determina la efectividad de los modelos de estados estacionarios (EE) empleados en control de procesos con la finalidad de monitorizar cómo transcurre el desempeño de las condiciones de operación y/o cómo optimizarlas con objetivos económicos (Isermann y Balle, 1997; Goodwin y otros, 2001; Isermann, 2005; Skogestad, 2012a). La DEE certera es crucial para la aproximación de sus muestras a los valores medios en el ajuste de dichos modelos.

Los procesos industriales y las plantas nunca se encuentran en un EE tal y como lo define e indica la teoría (Bagajewicz, 2001). Desde el punto de vista práctico, en un sistema dinámico los intervalos de tiempo de EE hay que localizarlos cuando esté operando en torno a algún punto estable o dentro de una región de estacionariedad y asumir que la razón de cambio de la variable de proceso (VP) es estadísticamente no significativa o despreciable (Kelly y Hedengren, 2013). Desde el punto de vista que las variables de procesos están contaminadas con ruido, una técnica para DEE debe ser robusta al determinar los intervalos de tiempo en EE ante la presencia de ruido de diferentes potencias y grado de auto-correlación. Un modo de evaluar la robustez de un método respecto a otro es calculando los errores que comete en acertar en la condición que tiene cada muestra de EE o estado transitorio (ET) (Rhinehart, 2013).

En esta temática de la DEE existen numerosos trabajos recientes abordando diversas técnicas. En (Le Roux y otros, 2008) se interpolan ventanas de datos con polinomios y sobre esta curva emplean un criterio basado en el cálculo de la derivada. La técnica de (Kim y otros, 2008) calcula la desviación estándar por ventana y compara cada resultado con un valor de umbral. La técnica en (Cao y Rhinehart, 1995; Cao y Rhinehart, 1997; Neha y otros, 2010; Rhinehart, 2013) calcula un estadígrafo R y lo compara con dos valores de umbral y se aplica en (Mansour y Ellis, 2008; Ye y otros, 2009). En (Mhamdi y otros, 2010) determinan los coeficientes wavelets a ventanas de datos tomando como condición de EE a valores de umbral tendientes a cero. La técnica en (Kelly y Hedengren, 2013) desplaza la ventana al paso igual a su tamaño y establece dos valores de umbral para evaluar los resultados del indicador calculado en cada ventana.

Al aplicar estos algoritmos a los registros del generador de vapor (GV) formando parte de la unidad de generación eléctrica (UGE) conectada al sistema eléctrico (SE) se detectó inestabilidad por las siguientes razones: (i) las muestras están contaminadas con ruido auto-correlacionado (coloreado) y no como asumen que el ruido presente es blanco, (ii) cuando la selección del ancho de la ventana es más corta que las que exige las características espectrales del ruido y la duración de las transiciones entre puntos de operación en EE conduce a errores, (iii) cuando el paso de desplazamiento de la ventana está dado por su ancho, ante una detección incorrecta, el resultado es de un error de magnitud igual al número de muestras de dicha ventana, (iv) ante un criterio por desviación estándar de umbral por ventanas se comenten errores en la zona de la transición entre tipos de estados. La robustez en la DEE se evalúa mediante los errores cometidos al no ubicar cada muestra correctamente en el intervalo a que pertenece.

El contexto de la aplicación industrial de esta investigación, es la UGE operando para el SE a una potencia nominal de 250 MW y un límite inferior comprendido entre 125 y 150 MW por lo que se considera de amplio rango. El Centro de Despacho de Carga (CDC), le asigna que genere durante intervalos de tiempo, que oscilan entre decenas de minutos, horas y días, diferentes valores de potencia (Ilic y otros, 1997; Welfonder, 1999). El GV le aporta a la turbina un flujo de vapor sobrecalentado a su salida, que a potencia nominal es de 840 t/h con una presión en el domo mayor de 13 MPa. El sistema de control tiene que hacer cumplir que el valor medio estabilizado de cada VP quede entre los límites normativos de máximas desviaciones de sus lecturas (IEC, 1990; ASME, 1998; ASME, 2010; Branislav y Radisa, 2011).

El ensuciamiento de superficies exteriores de intercambiadores de calor, las fugas de vapor, la pérdida de aislamientos en tuberías, el desgaste de impelentes, entre otros, le representan al sistema de control un tipo de perturbación que se desarrolla en una escala de tiempo del orden de horas, días, y semanas, ante las cuales reacciona, modificando las relaciones de entrada salida de EE del proceso (Teruel y otros, 2005; Peña y Blanco, 2006; Thornhill y Horch, 2007; Blanco y Peña, 2008; Kurz y otros, 2009; Ballester y García, 2010; Finn y otros, 2010; Horowitz y Alfie, 2010; Usón y Valero, 2011).

La aplicación de los resultados de la DEE en esta investigación es a la monitorización del desempeño de la operación del GV bajo el efecto de este tipo de perturbación denominada de lento desarrollo. El desempeño se evalúa por las magnitudes de las desviaciones entre el valor actual de EE de cada variable respecto al valor que debía tener. Este último valor o de referencia puede disponerse de dos formas: (i) como un valor especificado por diseño (valores normativos), (ii) como un valor establecido de las pruebas de comportamiento (después de los mantenimientos). Para este segundo caso, a

estos valores se le denominan de buen desempeño de la operación y son relativos. Su carácter relativo se debe a que tienen validez a partir del arranque después de cada procedimiento de mantenimiento (Gay y otros, 2006; Alpay y otros, 2007; Özer y otros, 2009; Can y Mazumder, 2013; Jiang y Foster, 2013; Jiang y Foster, 2014).

Del análisis anterior se ha puesto en evidencia que no obstante al número de investigadores en la temática de DEE, aún se aprecian insuficiencias en la robustez de los métodos, observándose que en la literatura científica predomina el diseño y aplicación de los métodos en la industria de procesos químicos (Cao y Rhinehart, 1995; Cao y Rhinehart, 1997; Brown y Rhinehart, 2000; Mansour y Ellis, 2008; Ye y otros, 2009; Neha y otros, 2010; Rhinehart, 2013; Kelly y Hedengren, 2013) y es prácticamente nula para aquellos presentes en las UGE y en sus generadores de vapor (Branislav y Radisa, 2011). Reconociendo las particularidades del control de procesos químicos y del control de las UGE, la Federación Internacional de Control Automático (IFAC) las separa en dos áreas diferentes de aplicaciones (Schlacher, 2009). La revisión de la literatura científica denotó falta de precedencia en la definición de un procedimiento para 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 asuma como **problema científico** al siguiente:

Problema científico: Existen limitaciones en la detección de intervalos de tiempo en EE en series temporales contaminadas con ruido y portadoras de efectos de perturbaciones de lento desarrollo que afectan al desempeño de la operación del GV.

Una vez realizada la revisión bibliográfica, considerando las posibles respuestas a la problemática científica y después de confeccionado el marco referencial, que se describe en detalles en los capítulos uno y dos, se plantea la siguiente **hipótesis de investigación**:

Hipótesis: Si se tienen series temporales contaminadas con ruido y portadoras de efectos de perturbaciones de lento desarrollo que afectan al desempeño de la operación del GV, *entonces* es posible el desarrollo de técnicas que permitan, de modo robusto, detectar los intervalos de EE, y a partir de sus resultados, establecer un procedimiento que contribuirá a lograr que el diseño y explotación de un sistema de monitorización de tal desempeño sea de mayor grado de precisión y certeza.

Precisándose como **objeto de la investigación** la DEE en las series temporales contaminadas con ruido y la detección de las desviaciones por variable de sus valores de buen desempeño de la operación del GV por efecto de perturbaciones de lento desarrollo.

El **campo de la investigación** se enmarca en los métodos para la DEE y en un procedimiento para el diseño y explotación de un sistema de monitorización del desempeño de la operación del GV afectada por perturbaciones de lento desarrollo.

Dentro de este contexto, se pretende con el trabajo de investigación, cumplir los siguientes objetivos:

Objetivo general: Proponer un método de detección de intervalos de tiempo en EE y un procedimiento para el diseño y explotación de un sistema de monitorización del desempeño de la operación del GV ante perturbaciones de lento desarrollo.

Objetivos específicos:

1. Analizar en la bibliografía especializada dentro del objeto de investigación, los fundamentos teóricos relacionados con la DEE y la monitorización del desempeño de la operación ante los efectos de perturbaciones de lento desarrollo al GV.
2. Diseñar un método para la DEE.

3. Diseñar un algoritmo para determinar los segmentos coincidentes en el tiempo entre aquellos detectados a múltiples variables.
4. Evaluar estadísticamente el desempeño del método de DEE propuesto con otros recientemente publicados en artículos científicos sobre el tema.
5. Verificar el correcto funcionamiento del algoritmo de determinación de coincidencias.
6. Definir los pasos y criterios de un procedimiento para el diseño y explotación de sistemas de monitorización del desempeño de la operación ante los efectos de perturbaciones de lento desarrollo.
7. Mostrar resultados de la aplicación del procedimiento.

Para cumplir con los objetivos del trabajo se consideran las siguientes **tareas de investigación:**

1. Valoración de las fuentes bibliográficas especializadas con el tema objeto de investigación.
2. Desarrollo de un método para la DEE.
3. Diseño de un algoritmo para determinar los segmentos coincidentes en el tiempo entre aquellos detectados a las múltiples variables.
4. Evaluación comparativa, mediante técnicas estadísticas, del efecto del ruido contaminante sobre el rendimiento del método de DEE propuesto respecto a otros métodos recientemente publicados en artículos científicos sobre el tema.
5. Verificación del algoritmo de determinación de coincidencias.
6. Definición de los pasos y los criterios del procedimiento para la monitorización del desempeño de la operación del GV ante el efecto de perturbaciones de lento desarrollo.
7. Presentación de resultados de la aplicación del procedimiento en casos de estudios.

Como principales métodos de investigación empleados, se mencionan: **el método hipotético deductivo**, al elaborar la hipótesis de investigación a partir de los resultados derivados de la revisión bibliográfica y confección del marco teórico, y al arribar a conclusiones a partir de la hipótesis establecida y posibles resultados; **el método sistémico**, al relacionar varias disciplinas para definir el procedimiento de diseño de sistemas de monitorización del desempeño con magnitudes de EE que le aporta el método; **el método lógico-inductivo**, al estudiar y caracterizar la regularidad con que se llevan a cabo los procedimientos de explotación ininterrumpida de los operadores, las formas de las curvas entre variables en EE que establecen los fabricantes y los laboratorios especializados mediante las cuales se rige el buen desempeño relativo de la operación, para llegar a conocimientos generales que se relacionan y aplican al GV bajo estudio; **el método de modelación**, al aportarle al procedimiento una solución de estimar los valores esperados por variable a través de una curva interpolada con valores de buen desempeño relativo; y finalmente **el método experimental**, al efectuar las pruebas prácticas para comprobar y fundamentar los estudios realizados, este método se combina con el **método estadístico**, que ofrece una vía de evaluar comparativamente los resultados de los métodos de DEE y de estimación de varianzas del ruido contaminante en las señales y discernir a favor de la selección del más adecuado.

Aportes y novedad

Aporte teórico

Un método nuevo para la DEE, robusto ante la presencia de ruido, demostrándose con la estadística, que exhibe un desempeño significativamente mejor que otros recientemente publicados en artículos científicos sobre el tema.

Aporte práctico

Aplicación del método de DEE y el procedimiento sobre registros industriales que permiten detectar oportunamente los efectos de acciones perturbadoras de lento desarrollo que afectan el desempeño de la operación del GV.

Aporte metodológico

La obtención de un procedimiento que integrando armónica y sistémicamente a disciplinas de varias ingenierías define pasos y criterios para el diseño de sistemas de monitorización del desempeño de la operación ante los efectos de perturbaciones de lento desarrollo del GV.

La novedad científica radica en proponer un método que combina una técnica estadística para la DEE con una técnica de extracción de tendencia sobre los intervalos candidatos de EE lo cual garantiza mayor precisión y exactitud en los valores de EE detectados por variable. La introducción del segundo paso, además de superar las insuficiencias que un método basado en desviación estándar de umbral tiene con la discriminación en la zona de transición, aporta la tendencia del segmento candidato y con esta, confiere flexibilidad a la prescripción de los límites de tolerancia que determinan la validez del valor medio del intervalo de EE resultante. Esta solución no se encuentra reportada en otro método para la DEE.

Organización de la tesis

El informe investigativo está formado por la introducción, el desarrollo organizado en cuatro capítulos, las conclusiones, seguido de las recomendaciones relativas a investigaciones futuras, y finalmente, las referencias bibliográficas y anexos correspondientes.

En el primer capítulo se analizan los aspectos principales relacionados con la DEE sobre series temporales industriales, abarcando los fundamentos teóricos básicos en la caracterización de las señales que proceden de sistemas con control de planta completa. Se aborda el marco teórico con un enfoque dirigido a concebir el planteamiento de la hipótesis de la tesis sobre la base de una actualizada revisión bibliográfica. Se incursiona en los conceptos asociados a este campo del conocimiento, disponiendo de la base teórica para asimilar los aspectos tratados en capítulos siguientes. Se realiza un análisis crítico de las soluciones existentes en la DEE.

En el segundo capítulo se sintetizan los aspectos fundamentales, con carácter interdisciplinario, que requiere la fundamentación de un procedimiento dedicado a la monitorización del desempeño de la operación, con magnitudes de EE del GV sometido al efecto de las perturbaciones de lento desarrollo.

En el tercer capítulo se proponen: (i) un método basado en ventanas deslizantes para la DEE por serie temporal de cada variable con un algoritmo adicional que determina los intervalos de EE coincidentes entre múltiples variables y (ii) un procedimiento de diseño y explotación de sistemas de monitorización del desempeño de la operación del GV ante los efectos de perturbaciones de lento desarrollo.

En el cuarto capítulo se evalúa estadísticamente la robustez del método propuesto en comparación con los métodos de Rhinehart (R) y de Jeff (J). Se constata la efectividad del procedimiento al aplicarlo a la monitorización del desempeño de la operación, bajo diferentes criterios y plazos de observación, a un GV y a un sobrecalentador de techo.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA LA DETECCIÓN DE ESTADOS ESTACIONARIOS

En este capítulo se realiza un análisis de los aspectos principales relacionados con la DEE sobre señales industriales, abarcando los fundamentos teóricos básicos en la caracterización las señales que proceden de sistemas con control de planta completa. Se aborda el marco teórico con un enfoque dirigido a concebir el planteamiento de la hipótesis de la tesis sobre la base de una actualizada revisión bibliográfica. Se incursiona en los conceptos asociados a este campo del conocimiento, disponiendo de la base teórica para asimilar los aspectos tratados en capítulos siguientes. Se realiza un análisis crítico de las soluciones existentes en la DEE.

1.1 El control de planta completa

El término control de planta completa es sinónimo de estructura jerárquica de control que divide la planta en capas separadas por las escalas de tiempo de las funciones que se realizan en cada una (Skogestad, 2012a). Los niveles inferiores se ocupan del objetivo de la regulación a corto plazo y por encima del nivel de supervisión están la monitorización y optimización estática de tiempo real (RTO) cuyo objetivo es el desempeño económico bajo indicadores de eficiencia con que evoluciona la operación a

largo plazo de la planta. Es a este nivel que se aplican los resultados de la DEE. Los dos conceptos que intervienen en el seguimiento del cumplimiento de este objetivo son los enunciados a continuación.

El rendimiento específico (throughput) de la planta está dado por la cantidad de material que se procesa por unidad de tiempo. Es un criterio de evaluación extensivo, o sea, está basado en variables que representan cantidad de material que podrá ser procesado o pasar a través de un proceso, sea, masa, flujo de masa, flujo de energía, etc.

El desempeño (performance) es un término de calidad para representar lo bien que el proceso transcurre, por ejemplo, el grado de desviación de una respuesta respecto al valor de buen desempeño relativo. Es un criterio de evaluación intensivo, o sea que no depende de tamaño. Por ejemplo, las desviaciones detectadas sobre una variable temperatura.

1.2 La dinámica de los procesos, las mediciones y el registro industrial

Los procesos industriales son sistemas dinámicos que tienen sus peculiaridades que los distinguen. Así por ejemplo, los procesos químicos están caracterizados por constantes de tiempo del orden de 1 segundo hasta 1 hora, son multivariantes (acoplados y no lineales), con auto-correlación suave y de breve duración, y cambios en la varianza de la señal con las condiciones del punto de operación. En el caso de las UGE construidas sobre ciclos térmicos y conectadas a un SE las transiciones se rigen por el rol que le es asignado en la entrega de potencia (Ilic y otros, 1997; Ilic, 2007). Sus constantes de tiempo son mayores en el GV, del orden de unidades a centenas de segundos.

1.2.1 El muestreo de las variables de proceso

En los sistemas de control en computadora al operar con señales de tiempo discreto

adquiridas de sistemas continuos es necesario tener en cuenta el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon (Nise, 2011). En (Aström y Wittenmark, 1997) se ofrecen recomendaciones de intervalos de muestreos según sea el tipo de medición (temperatura, presión, nivel, flujo). Los medios técnicos de automatización tales como: autómatas programables, reguladores compactos, entre otras tecnologías, tienen un tiempo mínimo de ejecución del procesamiento de los datos en torno a 0.1 s. Cuando éste es el caso, los controladores digitales operan como si fuesen de tiempo continuo.

Del análisis realizado se ratifica que en dependencia la naturaleza física de la cual procede cada tipo de medida así será la rapidez esperada con que podrían variar sus valores adquiridos. Al tomar datos de variables de diferentes tipos a la misma tasa de muestreo se tendrá valores sobremuestreados en diferentes número de repeticiones en unas que en otras.

1.2.2 El registro industrial

La entrada a la DEE son sucesiones de datos en el tiempo cuyos valores representan mediciones ininterrumpidas de VP que están contaminadas con ruido. Las señales industriales están afectadas por una amplia gama de ruidos, predominando su naturaleza aditiva regida por la siguiente regla (Cao y Rhinehart, 1995; Couch II, 2002; Chaparro, 2011):

$$x(t) = y(t) + v(t) \tag{1.1}$$

donde $x(t)$ representa a la señal registrada, $y(t)$ es la señal original sin ruido, la VP y $v(t)$ el ruido que puede tener diferentes orígenes.

La comunidad científica que estudia los temas de procesamiento de señales las

representan por funciones de una o varias variables en el tiempo y las clasifica en analógicas y digitales. Las primeras se representan por funciones que pueden tomar infinitos valores en un intervalo de tiempo, por ejemplo la mostrada en la figura 1.1a. Las denominadas como digitales son aquellas que pueden tomar un número finito de valores en intervalos de tiempo (Chaparro, 2011). La figura 1.1b muestra el efecto del ruido sobre la señal de la figura 1.1a. Se puede apreciar que la señal con ruido está distorsionada y es evidente que contiene otras componentes de frecuencias además de la original.

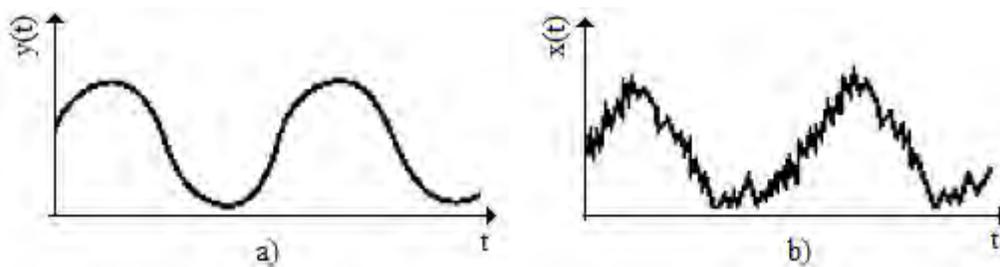


Figura 1.1: Representación de señales: a) analógica, b) efecto del ruido

1.2.3 Las mediciones industriales en plantas controladas

La VP, $y(t)$, procede de un subsistema de medición con su respectivo sensor. De éste es importante tomar en cuenta las siguientes consideraciones: (i) exactitud y resolución, (ii) precisión, (iii) sensibilidad, (iv) fiabilidad, (v) tiempo de respuesta, (vi) factibilidad práctica de operación a largo plazo y (vii) costo (Skogestad, 2012b).

La DEE se complementa con la detección de errores gruesos (DEG) y la reconciliación de los datos (RD) (Bhat y Saraf, 2004). Esta investigación emplea series temporales que portan mediciones procedentes de instrumentos calibrados aportando valores medios correctos. Los esfuerzos científicos van a la DEE prescindiendo de módulos dedicados a la DEG y la RD.

1.2.4 El ruido

La caracterización de las propiedades del ruido, $v(t)$, que como señal aleatoria contamina las mediciones de las VP, es vital para el diseño de un método para la DEE y el análisis de su desempeño.

La densidad espectral de potencia (Power Spectral Density), y la auto-correlación son dos propiedades para distinguir los diferentes tipos de ruido. La segunda está relacionada con la forma de distribución del espectro de potencia. Una señal cuyo espectro no sea plano (como el que caracteriza al RB) se dice que está coloreada y es auto-correlacionada. La función de auto-correlación (FAC) discreta R_{xx} para una señal x , estimada con un desfase j entre ventanas de L -muestras, se define como:

$$R_{xx}(j) = \sum_L \frac{(x_L - \mu)(x_{L-j} - \mu)}{\sigma^2} \quad (1.2)$$

R_{xx} es adimensional, μ y σ^2 es el valor esperado de x y su varianza respectivamente.

El ruido blanco (RB) es un caso particular de proceso estocástico estacionario en sentido amplio, en el cual las variables aleatorias que lo forman no están correlacionadas y el espectro de potencia no está limitado en banda. RB gaussiano es cuando su función de distribución de probabilidades responde a una de tipo normal. Su FAC es una función delta unitaria y su densidad espectral de potencia es su varianza, σ^2 .

En las señales industriales, la forma de distribución de probabilidades más común es la Gauss o Normal dada por la siguiente función (Coursey, 2003):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.3)$$

donde μ es la media de la función y σ la desviación estándar del ruido.

Una señal de ruido coloreado (RC) se puede sintetizar inyectando una señal de RB a un filtro H de polos y ceros (modelo ARMA). Precisamente una de las causas de contaminación con RC presente en las VP son los filtros en los sensores. La figura 1.2 muestra un esquema que permite disponer de una señal, $x(t)$ contaminada con ruido coloreado $v(t)$. Se parte de una señal base sin ruido $y(t)$. La síntesis de $v(t)$ resulta de aplicarle un filtro lineal H a la señal de ruido blanco $\eta(t)$.

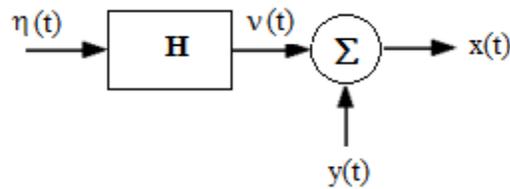


Figura 1.2: Esquema para contaminar con ruido coloreado

Para medir la influencia del ruido sobre una señal se utiliza la relación señal a ruido de pico (PSNR). Mientras mayor es la relación, menos efecto tiene la señal no deseada sobre la señal útil. Se define como la proporción entre la potencia de la señal con la potencia del ruido:

$$PSNR [dB] = 10 \log \frac{\text{media}(x(t))^2}{\text{varianza}(v(t))} \quad (1.4)$$

El ruido, $v(t)$ es producido por dos fuentes. La primera fuente son las fluctuaciones causadas por turbulencia del flujo, transferencias aleatorias de calor, movimiento térmico, vibraciones mecánicas, entre otros efectos. En segundo lugar existe otra de naturaleza eléctrica que se superpone a la señal de salida del transmisor. Afortunadamente, estos dos fenómenos ocurren a frecuencias bien diferentes permitiendo ser separadas mediante filtrado. Las fluctuaciones tales como: el mezclado no ideal, la dinámica del sensor, filtrados a la salida de sensores, la inercia térmica, las

de las acciones de control que generan los controladores de tiempo discreto, entre otras, se caracterizan por presentarse como ruido auto-correlacionado (Lipták, 2003).

La distinción entre el ruido correlacionado y no correlacionado depende de la relación entre la persistencia del ruido y el intervalo de tiempo de muestreo. Así, si el intervalo de muestreo fuera bastante pequeño respecto al tiempo de persistencia del evento, los valores aparecerán auto-correlacionados, en cambio, si el intervalo de muestreo es más largo que la persistencia de las perturbaciones, los valores dan la apariencia de estar independientes (Cao y Rhinehart, 1995).

1.2.5 La tendencia

La operación de obtener la señal de la figura 1.1a a partir de la señal de la figura 1.1b se le denomina extracción o identificación de tendencias.

Una tendencia, $\hat{y}(t)$, es una descripción temporal que resulta de transformaciones sobre $x(t)$. Representa las mediciones adquiridas del sensor. Lo deseado para $\hat{y}(t)$ es que la desviación entre $y(t)$ y $\hat{y}(t)$ tienda a cero, o sea, $\text{abs}(\hat{y}(t) - y(t)) \rightarrow 0, \forall t \in \mathbb{R}$ (Cheung & Stephanopoulos, 1990).

1.3 La detección de estados estacionarios

En una señal de tiempo continuo $x(t)$ la forma $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ es un registro de muestras. La DEE tiene como objetivo detectar sus posibles subconjuntos de muestras sucesivas en condición de EE. Ésta significa que, durante el intervalo de tiempo que abarca dicho subconjunto, el valor de la VP no cambia, es decir, la dispersión de los valores respecto a la media es tal que permite considerar que la variable no cambia en el tiempo. El concepto de EE es menos estricto que el empleado en la estadística mediante

los términos estacionario en el sentido amplio y estrictamente. En la estadística, estacionario requiere que no solamente la media de la serie temporal sea constante sino también que su distribución y auto-correlación no cambien con el tiempo. La condición de EE se refiere a la VP y no para el ruido contaminante (Cao y Rhinehart, 1995).

1.4 Registro de potencia de unidad de generación interconectada a sistema eléctrico

El análisis de los datos históricos, almacenados en los sistemas de supervisión (SCADA), de las mediciones de la potencia, N_p [MW] en la UGE, exhibe un patrón caracterizado por la alternancia de EE en torno a un nivel central de potencia y transiciones entre dichos estados tal y como los regímenes de operación en potencia de la unidad dos de la CTE Felton mostrados en la figura 1.3.

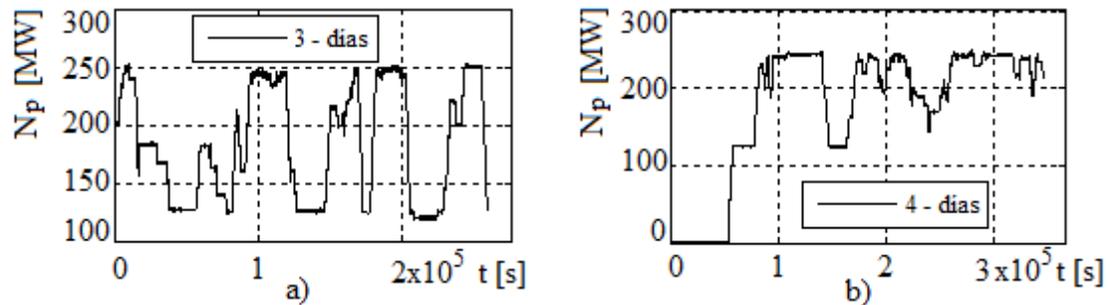


Figura 1.3: Registros de potencia de dos regímenes de operación

La figura 1.3a se presenta una muestra de tres días (del 05.02.10 al 08.02.10) y en la figura 1.3b se presenta una muestra de cuatro días (del 01.04.10 al 05.04.10).

Para modelar el ruido presente en las señales reales mostradas en la figura 1.3, se les determina sus histogramas en varios de sus intervalos de tiempo en los cuales existe condición de EE. Los resultados se grafican en figuras 1.4 y 1.5. De los gráficos se revela que se obtienen distribuciones de Gauss, lo que permite asumir para los ensayos de los métodos, que el ruido contaminante es de RB y RC gaussiano.

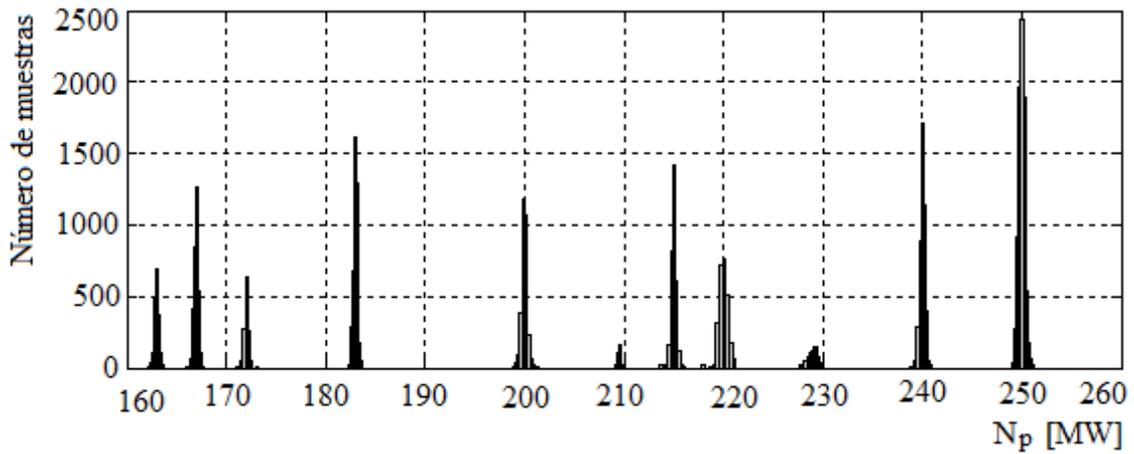


Figura 1.4: Histograma de los segmentos de EE de la figura 1.3a

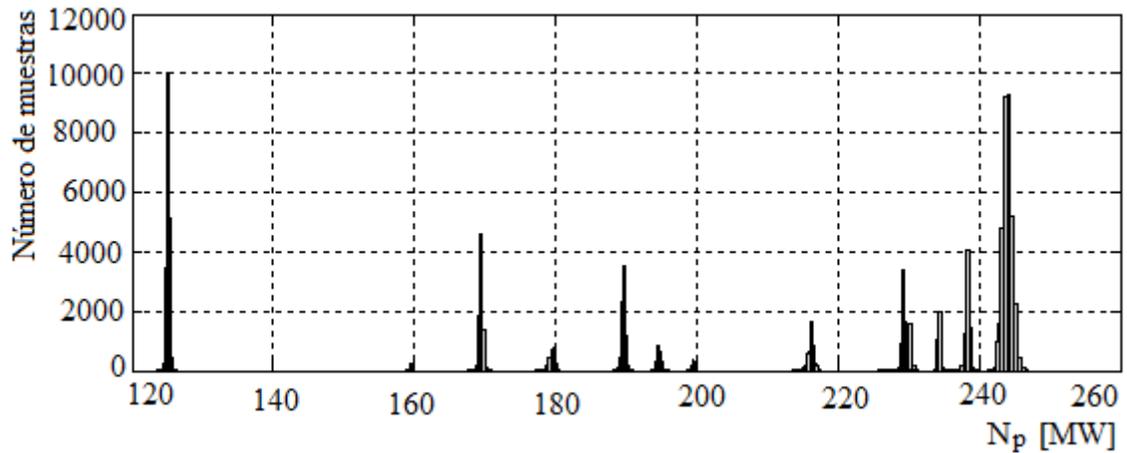


Figura 1.5: Histograma de los segmentos de EE de la figura 1.3b

El ruido contaminante en estos sistemas industriales se representa como variables aleatorias asociadas a procesos estocásticos ergódicos (Larsson y otros, 2008). Bajo esta condición, para cualquier subsegmento de la serie temporal todos tienen la misma distribución y los promedios estadísticos se estiman a partir de los promedios temporales. Así, si la función de distribución de probabilidades es del tipo de Gauss, entonces mediante la media y la desviación estándar se logra caracterizar estas series temporales (Chatfield, 2013).

1.5 Detección de estados estacionarios: técnicas existentes y su análisis crítico.

Tomando como referencia los términos en (Isermann y Balle, 1997; Isermann, 2005), respecto al tipo de modelo que se desee obtener y la función a realizar, con el procesamiento de $x(t)$ en torno a la DEE existen dos líneas de investigación:

Aquella a la que propiamente se le denomina como detección e identificación de los EE. La comunidad internacional considera aquellos métodos que procesan a $x(t)$, y como resultado devuelven sus respectivos intervalos de tiempo y a cada uno se le determina su valor medio. Estos valores son datos que se emplean para modelado en función de un problema de monitorización o de optimización estática.

La segunda línea de investigación parte de identificarle o de extraerle la tendencia, $\hat{y}(t)$ a $x(t)$, para determinar una representación cualitativa de la señal (Qualitative Representation of Signals) y con modelos cualitativos se implementa una función de detección de fallos (Flehmig y otros, 1998; Charbonnier y otros, 2005). Una señal industrial se representa mediante los siguientes tres tipos de episodios bases: incremento, decremento y EE. Ejemplos de estas técnicas se encuentran: con aplicación a: (i) plantas químicas (Sundarraman y Srinivasan, 2003), (ii) proceso biotecnológico en (Villez y otros, 2008; Villez y otros, 2013), y (iii) sistemas eléctricos en (Gamero y otros, 2011). En trabajo previo a (Mhamdi y otros, 2010), sus coautores (Flehmig y Marquardt, 2006) plantean que si se dispone de la tendencia de una variable, la DEE a partir de ellas es un caso particular. Extrayendo la tendencia a $x(t)$ con ajustes en ventanas de polinomios de orden n las clasifican de acuerdo al orden de la derivada a partir de la cual la $\hat{y}(t)$ representa a $y(t)$. Así se considera: (i) EE cuando el ajuste es con $n = 1$, (ii) es lineal con $n = 2$, y así sucesivamente. Su implementación iterativa a cada paso se sustenta en

evaluar si el error calculado está dentro de la tolerancia de umbral definida previamente. El inconveniente de esta técnica es el gran esfuerzo computacional al tener que chequear un número desconocido de combinaciones hasta que se satisfaga la condición de error y el conocimiento que se necesita para establecer la magnitud del error permitida.

Las técnicas QRS no contribuyen por sí misma a la solución del problema científico por cuanto con la identificación de un conjunto finito de tendencias no es posible detectar sistemáticamente las desviaciones que en una escala larga de tiempo exige la monitorización del efecto de perturbaciones de lento desarrollo. Sin embargo, si permiten el diagnóstico de fallos ya que estos se presentan como cambios diferenciados en una escala corta de tiempo (unidades de segundos, minutos) de los valores de operación normal pudiendo ser abruptos (décimas de segundo).

Los trabajos previos en área de DEE pueden ser clasificados en los siguientes casos (Mhamdi y otros, 2010):

- (i) Técnica basada en la regresión lineal para determinar el mejor ajuste con tendencia lineal para L valores anteriores de la variable. Heurísticamente, si el proceso está en EE, entonces la pendiente de la línea de tendencia será igual a cero. Sin embargo debido a la presencia de ruido en el proceso, la pendiente puede fluctuar con valores cercanos a cero y consecuentemente; un valor de la pendiente desigual de cero, no es razón para rechazar la hipótesis de EE. Para aceptar o rechazar la hipótesis podría usarse una prueba basada en la estadística t de Student aplicado al cociente entre el valor de la pendiente y el error estándar de ese valor. Si el cociente mencionado excede el valor crítico puede considerarse que hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis de que el proceso está en EE (Holly y otros, 1989; Bethea y Rhinehart, 1991).

(ii) Técnica basada en la evaluación de los valores promedios en ventanas sucesivas de datos con la desviación estándar similar. Si el proceso está en EE los promedios deben ser iguales en cada ventana. Las diferencias entre dos promedios consecutivos provocadas por la presencia de ruido pueden ser analizadas con una prueba de Student (Narasimhan y otros, 1987).

(iii) Técnica basada en el cálculo de la desviación estándar sobre cada ventana de datos y la comparación de los resultados con un valor de umbral; si el resultado calculado es mayor que el umbral, se considera que no existe condición de EE (Kim y otros, 2008; Kelly y Hedengren, 2013).

Una variante alternativa a (iii) es usar la prueba empleando el estadístico de Fisher basado en relación de varianzas calculada al mismo conjunto de datos; pero aplicando dos métodos diferentes (Crow y otros, 1955). Para reducir las insuficiencias de este último en (Cao y Rhinehart, 1995; Cao y Rhinehart, 1997) se introduce una modificación que se detalla más adelante.

El análisis crítico de los métodos existentes conduce a los siguientes resultados:

La técnica de regresión lineal empleada en (Holly y otros, 1989; Bethea y Rhinehart, 1991) constituye un caso particular del enfoque más general de los resultados presentados en (Flehmig y otros, 1998; Flehmig y Marquardt, 2006) los cuales se basan en la extracción de tendencias con estructuras de polinomios de orden n . Estos métodos además de requerir que la selección del ancho de la ventana sea mayor que la persistencia en la auto-correlación, tienen como inconvenientes que la extracción o identificación de tendencias requiere un mayor esfuerzo computacional en su implementación que aquellos que para la DEE se basan en cálculos como la media y la desviación estándar.

En (Narasimhan y otros, 1987) se propone una forma denominada teoría matemática de

la evidencia para la detección de cambios en EE. Ésta significa que en sucesivos períodos de tiempo, se llevan a cabo pruebas: (i) con t de Student entre dos medias y (ii) con la distribución de Fisher entre dos varianzas. Se considera EE si entre las dos medias y entre las dos varianzas no existen diferencias estadísticamente significativas lo cual es una suposición difícil de satisfacer en la práctica (Kelly y Hedengren, 2013).

En (Crow y otros, 1955) se aplican dos métodos diferentes en cada ventana de n muestras de X (asumen que no existe correlación entre sus muestras) para calcular el estadístico para la prueba de Fisher:

$$\sigma_{1,k}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.5)$$

$$\sigma_{3,k}^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=2}^n (x_i - x_{i-1})^2 \quad (1.6)$$

$$R_k = \frac{\sigma_{1,k}^2}{\sigma_{3,k}^2} \quad (1.7)$$

Si la serie temporal es estacionaria entonces, idealmente $R = 1$. Sin embargo debido al ruido la relación entre varianzas no será exactamente la unidad. Alternativamente, si el proceso no está en EE, $R \gg 1$.

Al método anterior, en (Cao y Rhinehart, 1995; Cao y Rhinehart, 1997) le aplican a X un filtro de media móvil exponencialmente ponderada (ecuación A1.1 del anexo A.1) y con su resultado van reemplazando a \bar{x} en (1.5), dando lugar al método de Rhinehart (R) (anexo A). Con esta transformación desaparece la necesidad de la selección de ventana deslizante. Las nuevas ecuaciones recursivas que permiten el cálculo de las varianzas más rápidamente son:

$$s_{1,k}^2 = \frac{2-\lambda_1}{2} \left(\lambda_2 (X_k - X_{f,k-1})^2 + (1 - \lambda_2) v_{f,k-1}^2 \right) = \frac{2-\lambda_1}{2} v_{f,k}^2 \quad (1.8)$$

$$s_{2,k}^2 = \frac{1}{2} (\lambda_3 (X_k - X_{k-1})^2 + (1 - \lambda_3) d_{f,k-1}^2) = \frac{d_{f,k}^2}{2} \quad (1.9)$$

$d_{f,k}^2$ puede ser consultada en la ecuación A1.3 del anexo A1

Con $0 < \lambda_{1,2,3} < 1$ un estimado de la relación de varianza es:

$$R_k = \frac{s_{1,k}^2}{s_{2,k}^2} = \frac{(2 - \lambda_1)}{d_{f,k}^2} v_{f,k}^2 \quad (1.10)$$

En el epígrafe 4.1.3 se ofrecen los valores de los tres coeficientes paramétricos ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) indicados por sus autores.

Si la señal no es estacionaria debido a un lento fenómeno transitorio, entonces $R_k > 1$. R_k podría ser menor que 1 para oscilaciones rápidas de x_i . Si no existe ruido y la señal está estacionaria, las estimaciones de varianza resultan ser cero y R_k no está definido. Ambos métodos requieren que exista un cierto nivel de ruido para aplicarlos.

Tanto el método en (Crow y otros, 1955) como en (Cao y Rhinehart, 1995) tienen el inconveniente que requieren que no exista ni auto-correlación del ruido contaminante ni correlación cruzada entre el ruido de las variables (Brown y Rhinehart, 2000).

El método de (Kelly y Hedengren, 2013), se basa en ventana deslizante, a un paso igual a su tamaño. La clasificación de cada ventana en EE o ET depende de dos valores de umbral y la desviación estándar (ecuaciones B6 y B7 del Anexo B). Su inconveniente es su paso ya que al desplazarse al mismo ancho de la ventana y cometer un error se propaga a todas las muestras.

El método de (Kim y otros, 2008) se basa en el cálculo de la desviación estándar en ventanas deslizantes paso a paso y la comparación con un valor de umbral, que al dejarse de cumplir, para que la sucesión de todas las muestras hasta aquí detectadas se consideren en EE debe verificarse el cumplimiento de otra condición de umbral dada por una

tolerancia de más o menos tres veces su desviación estándar. Para su uso, asumen que las muestras son aleatorias y normalmente distribuidas y en la selección de tiempo de muestreo debe asegurarse que no existe sobre-muestreo. Tiene el inconveniente que comete errores en la zona de transición y además, no se ofrece criterio a la sintonía de la desviación estándar de umbral por ventana. Por otro lado, la solución ofrecida para la DEE en coincidencia de sus siete variables es manual. Su fundamento matemático está en el Anexo C.

No se ha encontrado en la literatura científica la existencia de un método de DEE con enfoque multivariado. El carácter multivariable del sistema dinámico con control de planta completa exige que la DEE incluya un procedimiento de determinación de los intervalos de tiempo coincidentes entre todas las variables (Brown y Rhinehart, 2000; Flehmig y Marquardt, 2006). Dado que los métodos para la DEE operan sobre series temporales, se necesita de un procedimiento que determine los intervalos coincidentes entre varias variables.

De los inconvenientes señalados anteriormente es que se produce la necesidad de ir a la proposición de un nuevo método.

El desarrollo matemático de los métodos: de Rhinehart, de Kelly y Hedengren y de Kim se aporta en los anexos A, B y C respectivamente. Asimismo sus códigos en MATLAB (MATrix LABoratory) están en el anexo D.

1.6 Evaluación de los métodos: Criterio cuantitativo y técnicas estadísticas

Para evaluar el desempeño de los métodos de detección de segmentos en EE, de la prueba de hipótesis se adaptan los conceptos de los errores tipo I y tipo II.

Si se parte que de la señal base (aquella sin contaminar que representa a la VP) se conoce el estado de cada muestra, formando parte de un subconjunto en EE o en ET, entonces el método tiene cuatro posibilidades al evaluar la condición de cada muestra del registro en ese instante de tiempo: dos correctas, y dos incorrectas (véase tabla 1.1). Se comete un error de tipo I cuando una muestra está en condición de EE y sin embargo el método la incluye en el conjunto de ET. El error tipo II es al contrario, se comete cuando la muestra está en ET y erróneamente se incluye en el conjunto de muestras en EE.

Para la implementación computacional se le construye a cada señal base su respectiva señal binaria de referencia (Ref). Se codifica cada muestra con “1” para EE y “0” para ET. Al resultado de la acción del método de DEE también se le construye una señal binaria (Met) empleando el código anterior.

Tabla 1.1: Decodificación del resultado de la DEE por muestra

Ref	Met	EE	ET	Tipo I	Tipo II
EE (1)	EE (1)	1	0	0	0
ET (0)	ET (0)	0	1	0	0
EE (1)	ET (0)	0	0	1	0
ET (0)	EE (1)	0	0	0	1

La técnica de análisis de la varianza (ANOVA) se empleará para realizar demostración comparativa de significación estadística del desempeño entre métodos de DEE tomando como criterio cuantitativo al número de errores tipo I y tipo II cometidos por cada uno de ellos ante la presencia del ruido agregado a la señal base.

Conclusiones del capítulo

Presentado el marco conceptual y como resultado de un análisis crítico de la bibliografía consultada, se arriban a las siguientes conclusiones:

- (i) Se demostró que la DEE está en el área del conocimiento del control de procesos constituyendo un tema vigente que interviene en el contexto del control de planta completa y de cuyos resultados depende el éxito de la implementación de funciones de monitorización y optimización estática de tiempo real en su operación a largo plazo.
- (ii) A pesar de los métodos existentes para la DEE se reveló que subsiste inestabilidad en los algoritmos que asumen que la contaminación presente en los registros industriales es con RB.
- (iii) En la literatura científica consultada se constató que los métodos de DEE se aplican por serie temporal, con base matemática en el cálculo de estadígrafos por ventanas.

CAPÍTULO 2

EL PROCESO: FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y PRÁCTICOS PARA LA MONITORIZACIÓN

La monitorización de variables seleccionadas del GV a través de sus desviaciones entre los valores de EE detectados y los de buen comportamiento relativo caracteriza el desempeño (performance) de su operación afectada por perturbaciones de lento desarrollo. En este capítulo se sintetizan los aspectos interdisciplinarios requeridos para fundamentar los pasos y criterios de un procedimiento para el diseño y explotación de un sistema de monitorización como el de la figura 2.1.

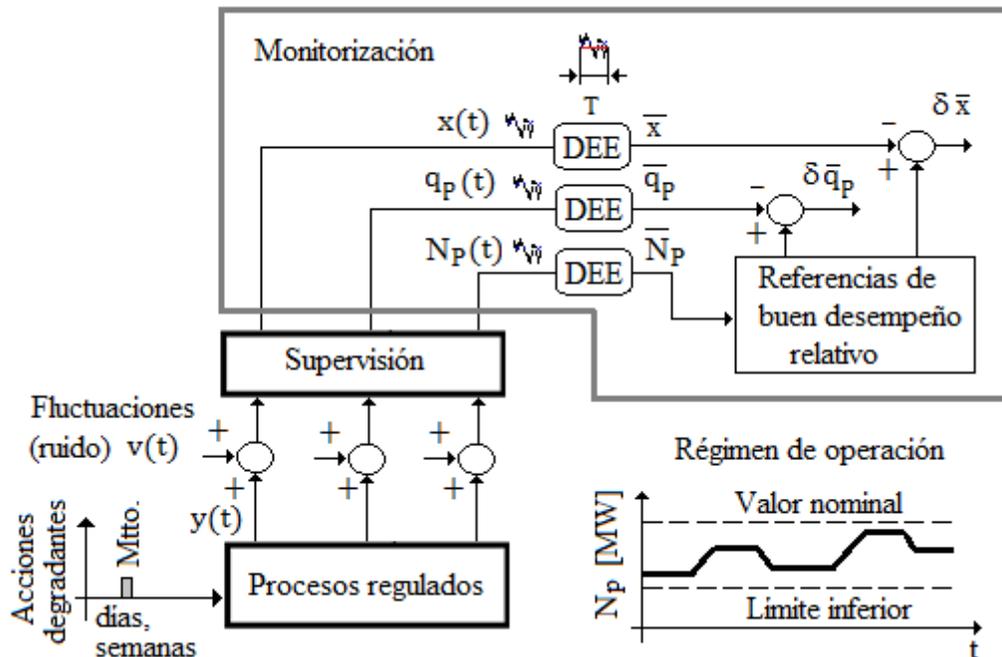


Figura 2.1: La DEE en la monitorización de la UGE

2.1 La jerarquía de control en el sistema eléctrico

Los sistemas eléctricos (Power Systems) están formados, en cuanto a su área de generación, por plantas de generación (Power Plants). Estas pueden estar constituidas por varias UGE. Cada una de ellas le aporta una potencia base al SE y el principal objetivo del sistema de control a este nivel, es suministrarle a los clientes la potencia que demandan con índices de calidad dados por: frecuencia, voltaje y su forma de onda. La estructura de jerarquía de control del SE se basa en tres niveles, que son: primario, secundario y terciario (Ilic y otros, 1997; Tan y Zhou, 2012).

El nivel de control terciario es pertinente en SE muy grandes y por esta razón, se justifica para las acciones reguladoras de los flujos de potencia entre subsistemas eléctricos regionales. Ejemplos de estos SE son los de Europa occidental, Rusia y Estados Unidos. El nivel secundario de control es coordinado con las UGE desde los centros para el despacho de carga (CDC), los cuales le asignan los valores de consigna de la potencia base de cada unidad, para desagregar la cantidad total que se demanda y regula durante periodos de tiempo. El nivel primario de control corresponde con la escala de tiempo más corta en la jerarquía. Es el implementado por hardware en cada UGE y para su regulación se descompone en dos partes: (i) la relacionada con la regulación de frecuencia del sistema gobernando su flujo de vapor a la turbina y con esto su aporte de potencia activa y (ii) la relacionada con regulación de voltaje a la salida del generador eléctrico (GE) y se implementa a través de la manipulación de su sistema de excitación para el control de la potencia reactiva. Estos subsistemas de control tienen que ser capaces de mantener los valores prescritos ante las rápidas y pequeñas desviaciones que demanda la carga.

2.2 La Unidad de Generación Eléctrica

Las formas de onda de las figuras 1.3a y 1.3b son reflejo de la evolución en potencia eléctrica de la UGE. Esta operación en potencia puede representarse de modo simplificado como se muestra en la figura 2.2 revelándose que puede ser tratado como un proceso de eventos discretos entre valores de EE detectado al registro de potencia.

En la figura 2.2a se denotan como α_j y β_i a dos tipos de segmentos de muestras. Los segmentos α_j contienen a un subconjunto de muestras que corresponden a mediciones bajo los efectos del sistema de regulación primario operando en torno a la potencia asignada por el CDC. Los segmentos β_i contienen a un subconjunto de muestras que corresponden a mediciones bajo los efectos del control secundario. Las formas de onda en transición pueden ser disímiles; pero todas están acotadas según la máxima velocidad de subida o bajada de carga que dependen de la velocidad de respuesta del GV.

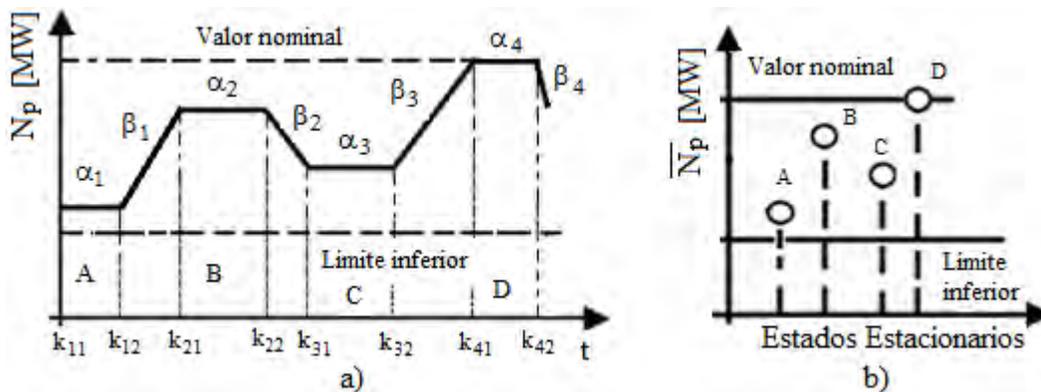


Figura 2.2: Modelo de la operación: a) en tiempo continuo, b) de eventos discretos

Los estados A, B, C y D de la figura 2.2b están asociados a segmentos α_j en torno a un nivel de potencia media, \bar{N}_p y unas fluctuaciones definidas por el rol de la unidad generadora en el SE (Welfonder, 1999). Los roles pueden ser:

- (i) como generador eléctrico (GE) que le suministra al SE una potencia base,
- (ii) como GE que suministra potencia para la regulación de frecuencia del SE.

Esta investigación se realiza sobre una unidad en el caso (i). Cuando la planta es operada en carga de base, el punto de operación se fija por la demanda de energía y el resto de los valores de las variables serán ajustados por los controladores hasta llevarlos a los que neutralicen las correspondientes desviaciones de EE. Bajo estas condiciones se puede considerar, para fines de modelado, la suposición de que cada variable puede referirse a la potencia media de EE (variable independiente).

2.2.1 El ciclo térmico y el generador de vapor

La UGE investigada tiene implementado un ciclo térmico de Rankine Regenerativo y Recalentado (Teir, 2003). El flujo de vapor producido actúa como fuerza mecánica para la conversión electromecánica de energía en el GE. La caracterización del proceso industrial permite revelar las relaciones estáticas que cada una de las posibles variables a seleccionar guarda con la potencia de la unidad.

Del ciclo térmico, el GV es el proceso que mayor cantidad de partes tiene distribuidas en la UGE. Incluyen los calentadores de combustibles, los quemadores, los precalentadores de aire (PCA), los calentadores de aire regenerativo (CAR), sobrecalentadores (SC), los recalentadores (RH), los ventiladores de tiro forzado (VTF), de tiro inducido (VTI) y los de recirculación de gases (VRG) con sus respectivas compuertas, atemperadores, la bomba de agua de alimentar, (BAA), los calentadores de alta presión (CAP), los calentadores de baja presión (CBP), los economizadores (ECO), las válvulas para la regulación de los flujos de combustible, de agua y de vapor.

Los fenómenos físicos (Vázquez y otros, 2004) comienzan combustionando al flujo de petróleo, \dot{V}_f , para transformar la energía química almacenada en sus enlaces atómicos en

energía eléctrica y su entrega contabilizada en forma de potencia eléctrica, N_p . La UGE opera dentro de un amplio rango en potencia, N_p , por lo que las variables que participan en la conversión electromecánica también toman valores en amplio rango. Las variables que participan del ciclo térmico deben ser mantenidas entre límites estrechos de tolerancia en torno a valores de buen desempeño relativo. Debido a la complejidad del control ante tal dualidad se introducen dos subsistemas adicionales. Éstos son: los subprocesos de atemperamiento en sobrecalentadores y recalentadores y la recirculación de gases desde la salida del ECO (antes de entrar a los CAR) y lo incorporan al horno de la caldera.

El primer subsistema es para compensar el exceso de temperatura del vapor sobrecalentado y recalentado al incrementar la combustión para elevar el flujo de vapor generado y el segundo subsistema basado en los VRG es para incrementar la transferencia de calor en el sobrecalentador, y fundamentalmente en el recalentador de vapor, para que éstos alcancen las temperaturas nominales de funcionamiento cuando la UGE opera a bajas cargas. Su acción es elevar la llama de forma que se realice una menor transferencia de calor en las paredes del hogar (horno) y aumentar el tiempo de residencia de los gases en la caldera. Según el tipo de caldera, cuando la carga está por encima de 50% y/o el 75% se saca de servicio el VRG. Su presencia innecesaria crea serias perturbaciones en la combustión e incluso puede provocar vibración de la caldera (Vázquez y otros, 2005; Vázquez y otros, 2009).

2.2.2 Caracterización de los tiempos de respuestas en la generación de vapor

La velocidad de respuesta de las variables y los tiempos en las transiciones entre EE en el GV dependen de la dinámica de los subprocesos referidos anteriormente. Numerosos

trabajos reportan con convergencia los órdenes de magnitud de constantes de tiempo que ante cambio del punto de operación en potencia caracterizan los tiempos de respuestas con variables de temperatura, presión, nivel entre otras (Report I.C, 1991; Maffezzoni, 1997; Lu y Hogg, 2000; Shin y otros, 2002; Blanco y otros, 2012a). De modo resumido en (Blanco y otros, 2013) se ofrecen los siguientes resultados:

$$\tau_w \approx 5 - 7 \text{ s}, \tau_p \approx 90 - 300 \text{ s}, \tau_L \approx 130 \text{ s}, \tau_{ES} \approx 5 - 15 \text{ s}, \tau_{MS} \text{ despreciable},$$

$$\tau_{ES} \gg 20 \tau_{MS}, \tau_R \approx 10 - 12 \text{ s}.$$

El significado de las constantes de tiempo es como sigue:

τ_w Constante de tiempo en la dinámica de producción de vapor respecto al cambio de calor Q_{ev}

τ_p Constante de tiempo en la dinámica de presión.

τ_L Constante de tiempo en la dinámica de nivel.

τ_{ES} Constante de tiempo en la dinámica de almacenamiento de energía del lado de vapor en el recalentador y sobrecalentador.

τ_{MS} Constante de tiempo de la dinámica de almacenamiento de masa del lado de vapor en el recalentador y sobrecalentador.

τ_R Constante de tiempo que expresa cambios en los volúmenes de energía en los calentadores de agua de alimentar mediante extracciones de vapor de la turbina.

2.2.3 Lazos de control en la generación de vapor

De la UGE, el proceso de interés para la aplicación de la técnica de DEE es el GV. Los lazos en un sistema de control de la caldera (Smith, 2010; Smuts, 2010) se sintetizan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Lazos del generador de vapor (*)

Nombre del lazo	Variable manipulada	Variable controlada
Carga	Flujo de vapor, \dot{m}_s (en modo seguimiento del GV) Flujos de combustible, \dot{V}_f y aire, \dot{V}_a (en modo seguimiento de Turbina)	Potencia, N_p
Presión del vapor a la válvula de control de la turbina, P_s	Flujos de combustible, \dot{V}_f y aire, \dot{V}_a (en modo seguimiento del GV) Flujo de vapor, \dot{m}_s (en modo seguimiento de Turbina)	Presión del vapor, P_s
Flujo de combustible, \dot{V}_f	Flujo de combustible, \dot{V}_f (mediante válvula)	Flujo de combustible, \dot{V}_f
Flujo de aire, \dot{V}_a	Flujo de aire, \dot{V}_a (mediante X_{VTF})	Flujo de aire, \dot{V}_a
Nivel del domo	Flujo de agua de alimentación, $\dot{m}_{w(b)}$.	Nivel del domo Flujo de vapor, \dot{m}_s Flujo de agua de alimentación, $\dot{m}_{w(b)}$.
Temperatura del vapor sobrecalentado, T_{SH}	Flujos de atemperamientos (según el número de pasos)	Temperaturas del vapor sobrecalentado, T_{SH}
Temperatura del vapor recalentado, T_{RH}	Flujo de atemperamiento Flujo de recirculación de gases (mediante X_{VRG})	Temperatura del vapor recalentado, T_{RH}
Exceso de aire	Flujo de aire, \dot{V}_a (mediante X_{VTF})	Composición de los gases de la combustión

(*) Ver la tabla F.1 del anexo F para la nomenclatura y significado de las variables.

Los primeros cuatro lazos listados en la tabla tienen que ver con la regulación de la potencia a convertir electromecánicamente y por ende operan con valores de consignas variables en dependencia de cada estadio en potencia a generar. Participan tanto en la regulación del nivel secundario (segmentos β_i) como del nivel primario (segmentos α_j). El resto de los lazos operan en torno a valores de consignas constantes para cualquier punto de operación en potencia. Éstos regulan los valores de las variables de temperatura y presión de cada subproceso en el ciclo térmico (Lindsley, 2005).

Los lazos listados anteriormente tienen que lograr los dos objetivos siguientes:

- (i) garantizar que se lleve a cabo el ciclo térmico en las magnitudes de presión y temperatura que lo implementan y
- (ii) responder con flujo de vapor a la conversión electromecánica de energía, que exige la respuesta a la potencia demandada del SE.

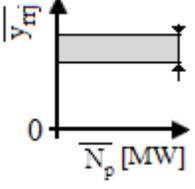
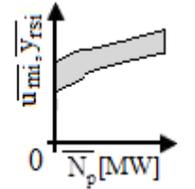
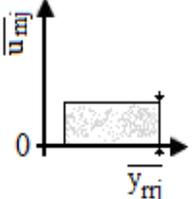
2.3 Clasificación de las variables

Del análisis de la relación que existe entre los regímenes de operación y los objetivos de los lazos de control se propone la clasificación de las VP de la tabla 2.2.

Con el subíndice “i” se refieren los lazos con valores de consignas constantes (del primer objetivo) y con el subíndice “j” los lazos que, además, operan en el nivel de control secundario con valores de consignas cambiantes (del segundo objetivo). Para las variables, la notación es como sigue: las variables manipuladas (VM), por u_{mi} y u_{mj} , las variables controladas (VC) por y_{rsi} y y_{rrj} , las variables de consigna por u_{rri} e u_{rsj} . La marca sostenida sobre cada variable, por ejemplo, $\overline{y_{rsi}}$, indica su valor medio de EE. A partir de la potencia eléctrica asignada a la UGE por el CDC, el resto de los valores de consignas que intervienen en la conversión electromecánica de energía, tales como: flujo

de combustible, flujo de aire, entre otros, se determinan a partir de curvas que representan sus relaciones no lineales de dependencia con ésta y entre ellas.

Tabla 2.2: Clasificación de las variables en la generación de vapor

Grupo	Tipo de consigna en monitorización	Rango	Rol	Dependencia con la potencia, N_p .
I	y_{rrj} : es una VC de un lazo de regulación.	Estrecho	Coordenadas (presión y temperatura) de un estado termodinámico del ciclo térmico	
II	y_{rsi} : es una VC de un lazo de seguimiento. u_{mi} : es una VM de un lazo de seguimiento	Amplio rango	Volúmenes de energía (mediante flujos)	
III	u_{mj} : medición en VM en lazos de atemperamiento y de recirculación de gases	Amplio rango entre cero y valor máximo	Garantizar las tolerancias permisibles para las variables de los Grupos I y II	

Ante variaciones en la demanda el sistema de control tiene que ser capaz de calcular aquellas entradas al proceso, u_{mi} , tal que se garantice un correcto balance de energía y con esto se mantenga la frecuencia eléctrica del SE. Como resultado se tiene un grupo de variables y_{rsi} cuyos valores dependen de la potencia.

Al tiempo que esto ocurre, un grupo de variables, y_{rrj} , que garantizan la calidad en la evolución del ciclo térmico, tienen que ser mantenidas en torno al valor deseado u_{rrj} . Para esto, la salida de cada regulador, u_{mi} se calcula de modo que su acción sea robusta

ante cambios en la demanda y las perturbaciones internas que reflejan el efecto de las acciones degradantes en la planta.

Del análisis interdisciplinario de la tabla 2.2 (Vazquez y otros, 2012a) se arriba a las siguientes conclusiones:

- (i) Las VC de presión y temperatura deben ser mantenidas en torno a valores predefinidos por diseño del ciclo térmico. De la tabla 2.1, estos son los lazos con VC del tipo y_{rrj} tales como: presión del vapor a la válvula de control de la turbina, de nivel del domo, temperatura de vapor sobrecalentado y temperatura del vapor recalentado.
- (ii) Las VC y las VM que intervienen en el nivel control secundario de la potencia entregada al SE (segmentos β_i) varían en amplio rango de operación. De la tabla 2.1 estos son los lazos con VM del tipo u_{mi} : flujo de combustible, flujo de aire, flujo de agua de alimentación, el flujo de vapor sobrecalentado y VC del tipo y_{rsi} tales como: las VC correspondientes a las VM anteriores y la potencia.
- (iii) Las VM (u_{mj}) que intervienen en el control de recirculación de gases y atemperamiento de vapor sobrecalentado y recalentado van de cero y un valor máximo. Por ejemplo: los flujos de atemperamientos intercalados en los SC y en los RH y el flujo de recirculación de gases.

Con esta clasificación se logra discernir sobre cuáles son las variables que permiten ubicar el punto de operación para la monitorización y sobre las formas de las curvas que rigen las relaciones de dependencia entre variables. Las variables del grupo II, son las que permiten detectar cualquier punto de operación de la UGE (Vazquez y otros, 2012a). En la monitorización del desempeño de la operación del GV, la selección de las VM es crucial. Los elementos de acción final son: el porcentaje de apertura de las compuertas que controlan flujos de aire y de gases, los porcentos de aperturas de las válvulas de agua, de vapor y de combustible.

2.4 Clasificación de las perturbaciones en control de planta completa

Las degradaciones en los componentes pueden provocar fallos o al menos causar perturbaciones en la operación de la planta completa. La primera distinción para clasificar las perturbaciones que inciden en el desempeño de la operación de toda la planta tiene que ver con la escala de tiempo en que se observan sus efectos (Thornhill y Horch, 2007). De esta forma, las perturbaciones se subdividen en:

- (i) de lento desarrollo: Se presentan en la industria de procesos químicos y de generación. Se deben al fenómeno de degradación del catalizador, de ensuciamiento de superficies en intercambiadores de calor, al frenado paulatino de ventiladores, entre otras. El análisis del segundo efecto ha sido de interés en los últimos años (Bermingham y otros, 1999; Yang y otros, 2009; Markowski y otros, 2013; Kuwahara y otros, 2013).
- (ii) persistentes y dinámicas, por ejemplo las producidas por la histéresis de las válvulas de control (Bacci di Capaci y Scali, 2014; Cecílio y otros, 2014).
- (iii) abruptas, por ejemplo la salida por disparo de un compresor, o fallos de hardware en plantas químicas (Yeh y Chang, 2011).

Las perturbaciones de lento desarrollo (por ejemplo, la disminución del flujo de calor por ensuciamiento de superficies exteriores) varían los valores de EE de las variables de proceso de sus respectivos de buen desempeño relativo. En virtud de que la UGE se puede tratar como un proceso de eventos discretos entre valores de potencia dentro de su rango de operación, ésta es la variable que determina las magnitudes de los flujos de energía y de materiales. En los intervalos de tiempo en EE, la demanda de potencia es aproximadamente constante y el resto de las variables serán ajustadas por los controladores según sus correspondientes valores de EE. Los valores medios por

segmento de EE de las VP corresponden a los que la acción del control realiza para mantener la operación sin acumulación ni de energía ni de materiales. Por ende, en la medida que perturbaciones lentas, tales como: el ensuciamiento de superficie, el frenado paulatino de ventiladores, entre otras, vayan desarrollándose, los controladores se encargarán de reaccionar con valores de EE que ofrezcan los niveles de demanda solicitados (Stoppato y otros, 2012).

Del análisis anterior se deriva que con los resultados de la DEE se pueden detectar los efectos que le producen las perturbaciones de lento desarrollo al desempeño de la operación.

2.5 Monitorización: Curva de buen desempeño relativo y ventanas

Para la degradación por ensuciamiento de superficies exteriores, el diseño de la automatización de la UGE incluye la limpieza periódica mediante una acción de soplado con vapor, aire o ultrasónica. Sin embargo, aún con esta acción correctora, en (Kuwahara y otros, 2013) se revela que estos fenómenos provocan un decremento acumulativo de los coeficientes de transferencias a lo largo del tiempo. Este tipo de acción degradante tiene períodos de inducción que pueden ir desde varios días hasta un mes (Yang y otros, 2009; Markowski y otros, 2013).

Durante la operación ininterrumpida, a estas desviaciones acumulativas se van adicionando los efectos de las perturbaciones actuales, y en dependencia de la efectividad que se logre con el soplado, se irán reduciendo sucesivamente hasta que el nivel de afectación afecte el desempeño que demande un mantenimiento corrector. Para este caso extremo se requiere sacar de servicio a la UGE.

La monitorización del desempeño de la operación (figura 2.3) del GV está caracterizada por dos aspectos claves:

- (i) Regímenes de operación: son estabilizados en torno a valores de potencia media, en amplio rango, con paradas de planta para mantenimientos con el propósito de reducir el actual efecto negativo que sobre la eficiencia le ha ocasionado las acciones degradantes.
- (ii) Las perturbaciones que tienden a desviar las magnitudes de EE de las variables producen su afectación de modo: ininterrumpida, no determinística, y en una escala de tiempo de larga duración, por ejemplo: días, semanas y meses. Los efectos acumulativos que reflejan las degradaciones, requieren que las desviaciones detectadas por variable (entre su valor de EE actual y el de buen desempeño relativo) sean observadas a una escala de tiempo o ventana a largo plazo (VLP). El agrupamiento en ventanas de corto plazo (VCP) de subconjuntos de vectores de cada variable seleccionada que contengan la sucesión ordenada en tiempo de éstas permite explorar la variabilidad entre agrupaciones.

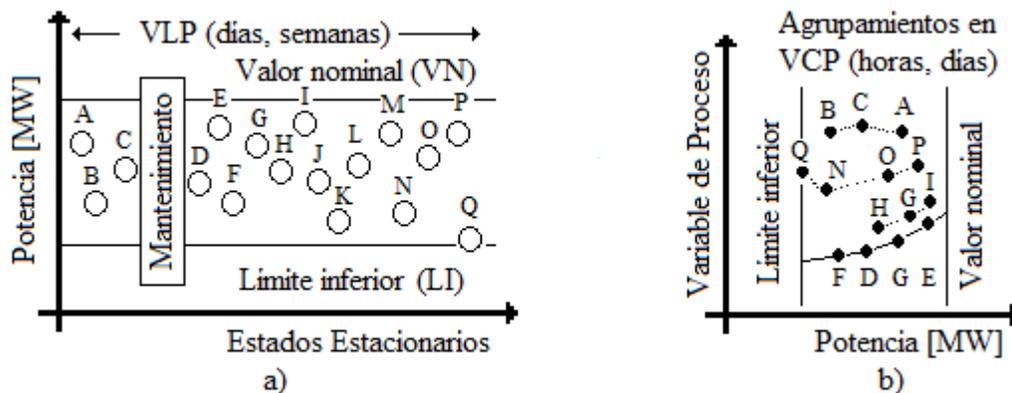


Figura 2.3: Operación en VLP: a) de amplio rango, b) agrupamientos

En la figura 2.3a cada círculo situado entre el límite inferior y el valor nominal es un estadio de un régimen de operación de la UGE. Se denota con una de las letras A, B,...P

y Q y representa un evento discreto caracterizado por su potencia, N_p . Cada uno agrupa a los valores de EE detectados al conjunto de variables seleccionadas con su respectiva información de fecha y tiempo. Los estadios A,B y C corresponden a intervalos de operación bajo el efecto de acciones degradantes tales que exigen una parada para mantenimiento. Cercano al arranque se tienen los eventos D, E, F y G.

La figura 2.3b muestra una solución a la monitorización de los efectos de las perturbaciones de lento desarrollo sobre una variable seleccionada cualquiera. En ésta, se muestra la curva construida por interpolación con sus valores en D, E, F y G. Éstos representan una operación bajo ese buen comportamiento relativo. Se agrupan en VCP sus valores en: A-B-C, G-H-I, N-O-P-Q (señalados por líneas discontinuas que los unen). Esas agrupaciones revelan que las desviaciones antes del mantenimiento eran las mayores (A-B-C) y que en fechas próximas al arranque eran las menores (G-H-I). Con el transcurso de la explotación fue incrementando según N-O-P-Q.

Físicamente podría bien ser una situación como la siguiente: si algunas semanas posteriores (por ejemplo: G-H-I) a unos ensayos de caracterización del desempeño de la operación (D-E-F-G), la cantidad de calor transferida al vapor es afectada por ensuciamiento, entonces, se estará necesitando mucha más cantidad de \dot{V}_f (la cual es una variable del tipo u_{mi}) para producir \dot{m}_s (la cual es una variable del tipo y_{rsi}). El chequeo sistemático del cumplimiento de la relación entre \dot{m}_s y \dot{V}_f conduce a la identificación de posibles deterioros. Se evidencia que el sistema de control siempre contrarrestará el efecto del ensuciamiento mediante un incremento de \dot{V}_f .

Conclusiones del capítulo

Presentado el marco conceptual que caracteriza la operación del GV y el tipo de perturbaciones de lento desarrollo que afectan su desempeño, se arriba a las siguientes conclusiones:

- (i) El GV en la UGE operando en carga base puede ser asumido como un sistema de eventos discretos caracterizados por los valores medios de sus VP que se le calculan en los intervalos de tiempo detectados en EE, siendo la potencia media, la variable independiente respecto a la cual pueden ser referidas.
- (ii) Con la interdisciplinariedad integradora con que se abordó este capítulo, es posible fundamentar un procedimiento que reduzca la falta de precedencia que se revela de la revisión de la literatura científica en cuanto al diseño y explotación de sistemas para la monitorización del desempeño de la operación del proceso investigado ante los efectos de acciones perturbadoras de lento desarrollo.

CAPÍTULO 3

MÉTODO PARA LA DETECCIÓN DE ESTADOS ESTACIONARIOS Y PROCEDIMIENTO PARA SU APLICACIÓN EN LA MONITORIZACIÓN

En este capítulo se proponen: (i) un método basado en ventanas deslizantes para la DEE por variable en señales industriales contaminadas con ruido, adicionándole un algoritmo para determinar los intervalos de EE coincidentes entre múltiples variables y (ii) un procedimiento de diseño y explotación de sistemas de monitorización del desempeño de la operación del GV ante los efectos de perturbaciones de lento desarrollo.

3.1 El método para la detección de estados estacionarios

El método nuevo se le denominó “Sigma - Gamma” y se describe en la figura 3.1. Sobre el registro $x(t)$ se desliza una ventana de ancho L (a un paso mayor o igual que uno y menor que L) indicándose sus posiciones con “1”, “2”, “m” y “p”. La discriminación de los ET se basa en calcular la desviación estándar en cada ventana, σ_{cal} y comparar su resultado con un valor de umbral, σ_n . Si σ_{cal} es superior a σ_n , se discriminan esas L -muestras y se explora la próxima ventana (que se posiciona según sea el paso). Si por el contrario σ_{cal} es menor que σ_n no se puede rechazar la hipótesis de que en la ventana la variable esté en estado estacionario y se marcan las coordenadas iniciales y finales de este segmento candidato. La coordenada k_1 del segmento candidato es la posición en el

tiempo de la primera muestra de la ventana y la coordenada final k_2 es la posición en el tiempo de la última muestra de la ventana. Una vez obtenido un segmento candidato se intenta ampliar el mismo incrementando el ancho de la ventana hasta que se incumpla la condición de umbral.

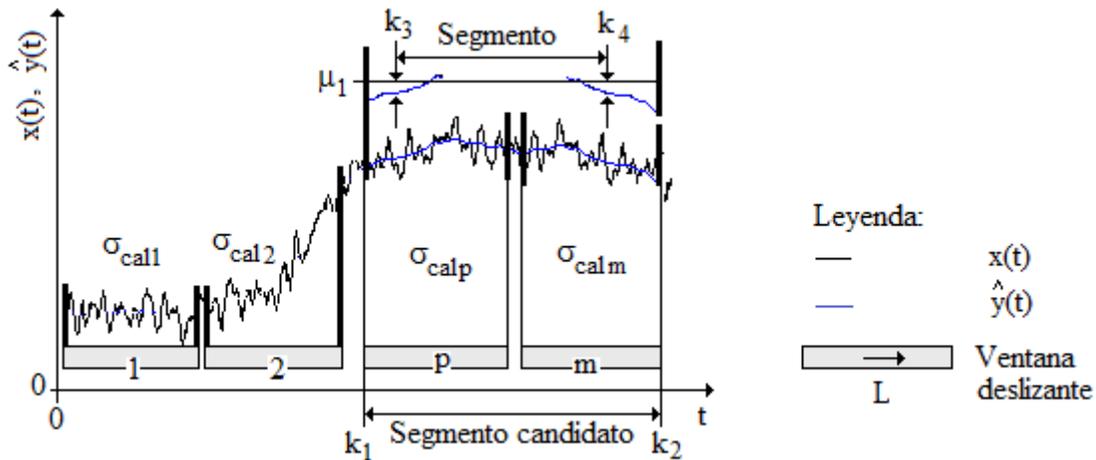


Figura 3.1: Método Sigma - Gamma

En la figura 3.1 se asume que la primera ventana que satisface la condición es la “p” y la misma se fue ampliando, mientras se cumplía la condición de umbral hasta abarcar la ventana “m”. Como resultado, las coordenadas del segmento candidato son $[k_1 k_2]$. Como la condición de umbral es necesaria pero no suficiente se incluye en el método un segundo paso orientado a refinar las coordenadas del segmento encontrado. Este segundo paso está basado en la extracción de la tendencia del segmento candidato, $\hat{y}(t)$, el cálculo de su valor medio, μ_1 , ($\mu_1 = media [x(k_1): x(k_2)]$) y una discriminación de muestras en ET aplicando una condición, denominada error de rectificación, e_R , a la máxima desviación de valor absoluto entre $\hat{y}(t)$ y μ_1 ($|\hat{y}(k_1) - \mu_1| < e_R$). Las coordenadas del segmento quedan en $[k_3 k_4]$ y su valor medio $\mu_2 = media [x(k_3): x(k_4)]$. Para validar la DEE, se chequea una condición de tolerancia denominada de verificación, e_v , tal que

la desviación del valor absoluto entre $\hat{y}(t)$ y μ_2 $|\hat{y}(k) - \mu_2| < e_V, \forall k/k_3 \leq k \leq k_4$.

Las coordenadas finales se concatenan con el atributo de fecha y tiempo. La extracción de tendencia se realiza por filtrado de medias móviles (Wai, 2009).

El método consta de los siguientes aspectos:

- (i) Estimación previa de la varianza de ruido en los registros a procesar.
- (ii) Segmentación (componente sigma) basada en cálculo de desviación estándar (σ).
- (iii) Rectificación de las coordenadas de cada segmento candidato (componente gamma) y verificación de la tolerancia de la media del segmento de EE con la tendencia.

Ejemplos de métodos basados en (ii): con ventana deslizante fija en (Kim y otros, 2008; Gude y otros, 2011) y con ventana deslizante extendida en (Blanco y otros, 2012a; Blanco y otros, 2012b; Blanco y otros, 2013). El método propuesto en esta tesis supera la insuficiencia de (ii) mediante (iii) y aporta una solución a (i) está en (Vázquez y otros, 2014). El término de segmentación se toma de (Basseville, 1988).

3.2 Condición necesaria para la varianza de un segmento en estado estacionario

Conociendo la varianza del ruido que afecta la señal, se encuentra una condición necesaria de estacionariedad.

3.2.1 Condición necesaria para el caso de contaminación con ruido blanco

Hágase notar que, por definición, si una señal se encuentra en EE sus valores se pueden expresar como una constante más una variable aleatoria que representa el ruido. La condición necesaria para el caso en que ese ruido sea blanco se expresa a través de la siguiente proposición:

Proposición 1: Sea $x_i = a + \eta_i$; $i = 1 \dots n$ donde a es constante y η_i son variables aleatorias normales e independientes unas de otras, de varianza σ^2 . Sea $\hat{\sigma}_n^2$ la varianza muestral observada, o sea:

$$\hat{\sigma}_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.1)$$

Entonces para cualquier $\tau > 1$, la probabilidad de que $\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2$, es:

$$P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2) \leq c \frac{e^{-(\sqrt{\tau}-1)^2 n}}{\sqrt{4\pi n}(\sqrt{\tau}-1)} \quad (3.2)$$

Donde c es una constante diferente de cero.

De esta proposición se desprende que si una señal se encuentra en estado estacionario y el ruido que la afecta es blanco entonces:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2) = 0 \quad (3.3)$$

Si se toma un valor adecuado de τ la probabilidad $P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2)$ disminuye rápidamente a medida que se incrementa el valor de n . En la figura 3.2 se muestran los valores del evento complementario $P(\hat{\sigma}_n^2 \leq \tau\sigma^2) = 1 - P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2)$, en función del número de muestras n , tomando $\tau = 1,71$.

Puede apreciarse, de acuerdo a la gráfica, que si se tiene una señal contaminada por RB gaussiano de varianza σ^2 :

- (i) Si la señal está en EE, se puede afirmar, con una alta probabilidad, que la varianza muestral $\hat{\sigma}_n^2$ ($n > 20$) no puede exceder el valor $1,71\sigma^2$.
- (ii) Inversamente, si la varianza muestral $\hat{\sigma}_n^2$ ($n > 20$) excede el valor $1,71\sigma^2$, entonces con una alta probabilidad puede concluirse que la señal, afectada por RB gaussiano de varianza σ^2 , está en ET.

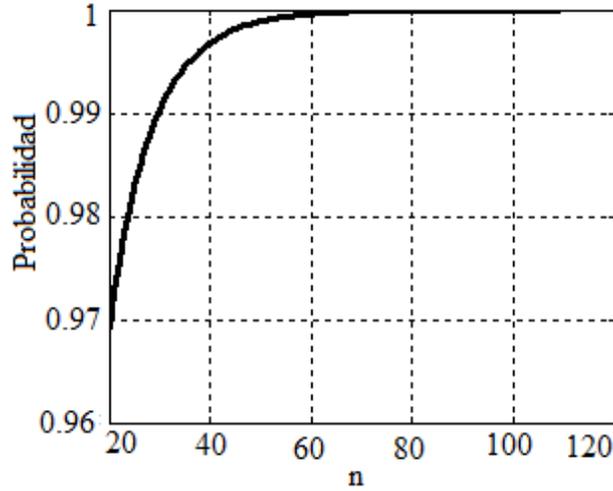


Figura 3.2: Criterio de selección de ancho de ventana ante RB

Estas afirmaciones ratifican el carácter de condición necesaria pero no suficiente, para la estacionariedad, que tiene la proposición 1.

La demostración de la proposición 1 se fundamenta en el siguiente lema:

Lema 1: Sea H_n la función de distribución de la distribución χ^2 con n grados de libertad.

Entonces para valores grandes de n y $\kappa > 1$ se cumple que:

$$1 - H_n(\kappa n) = O\left(\frac{e^{-(\sqrt{\kappa}-1)^2 n}}{\sqrt{4\pi n}(\sqrt{\kappa}-1)}\right) \quad (3.4)$$

donde, como es usual, se dice que $f(n) = O(g(n))$ si

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} = 0 \quad (3.5)$$

y además:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} = c; \quad c \neq 0 \quad (3.6)$$

La nomenclatura O identifica a sucesiones que tienen un comportamiento similar en el infinito.

Demostración

La función H_n puede aproximarse para n grandes como (Borovkov, 1986):

$$H_n(x) \approx \Phi_{0,1}(\sqrt{2x} - \sqrt{2n-1}) \quad (3.7)$$

Donde

$\Phi_{0,1}$ es la función de distribución de la distribución normal estándar.

Consecuentemente, si se evalúa $x = \kappa n$ en (3.7) se tiene:

$$H_n(\kappa n) \approx \Phi_{0,1}(\sqrt{2\kappa n} - \sqrt{2n-1}) \quad (3.8)$$

Puede apreciarse que:

$$\sqrt{2\kappa n} - \sqrt{2n-1} = \sqrt{2n-1} \left(\sqrt{\frac{2\kappa n}{2n-1}} - 1 \right) \quad (3.9)$$

Esta última expresión para valores grandes de n es aproximadamente igual a:

$$\sqrt{2n-1} (\sqrt{\kappa} - 1) \quad (3.10)$$

Luego

$$H_n(\kappa n) = \Phi_{0,1} \left(\sqrt{2n-1} (\sqrt{\kappa} - 1) \right) \quad (3.11)$$

Si se utiliza ahora la aproximación para valores grandes de x :

$$\Phi_{0,1}(x) = 1 - \frac{\varphi(x)}{x} \quad (3.12)$$

Donde

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (3.13)$$

es la función de densidad de la distribución normal estándar, se obtiene:

$$H_n(\kappa n) \approx 1 - \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\sqrt{\kappa}-1)^2(2n-1)}{2}}}{\sqrt{2n-1}(\sqrt{\kappa}-1)} \approx 1 - O\left(\frac{e^{-(\sqrt{\kappa}-1)^2 n}}{\sqrt{4\pi n}(\sqrt{\kappa}-1)}\right) \quad (3.14)$$

Con lo que queda demostrado el lema.

Para demostrar la proposición 1 se debe notar que la desigualdad $\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2$ es equivalente a $\frac{(n-1)\hat{\sigma}_n^2}{\sigma^2} > \tau(n-1)$. Luego:

$$P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2) = 1 - P\left(\frac{(n-1)\hat{\sigma}_n^2}{\sigma^2} \leq \tau(n-1)\right) \quad (3.15)$$

Como es conocido, la variable $\frac{(n-1)\hat{\sigma}_n^2}{\sigma^2}$ sigue una distribución χ^2 con $(n-1)$ grados de libertad, por ello tenemos:

$$P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2) = 1 - H_{n-1}(\tau(n-1)) \quad (3.16)$$

donde H_n es la función de distribución de la distribución χ^2 con n grados de libertad.

Aplicando ahora el Lema 1 (tomando $\kappa = \tau$) para estimar la última expresión se obtiene:

Aplicando ahora el Lema 1 (tomando $\kappa = \tau$) para estimar la última expresión se obtiene:

$$P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2) = O\left(\frac{e^{-(\sqrt{\tau}-1)^2(n-1)}}{\sqrt{4\pi(n-1)(\sqrt{\tau}-1)}}\right) = O\left(\frac{e^{-(\sqrt{\tau}-1)^2n}}{\sqrt{4\pi n(\sqrt{\tau}-1)}}\right) \quad (3.17)$$

Con lo que queda demostrada la proposición.

3.2.2 Condición necesaria para el caso de contaminación con ruido coloreado

Supóngase ahora que el ruido es coloreado pero sigue una distribución gaussiana multivariada con varianza σ^2 y media nula. Se asume entonces que las variables aleatorias η_i son variables aleatorias normales pero no independientes (con posible correlación entre ellas). Sea Σ la matriz de covarianza de la distribución normal conjunta $\bar{\eta} = (\eta_1, \dots, \eta_n)$. Como es conocido, la matriz de covarianza se puede expresar como:

$$\Sigma = \sigma^2 \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{n-1} \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 & \cdots & \rho_{n-2} \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 & \cdots & \rho_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \rho_{n-1} & \rho_{n-2} & \rho_{n-3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \sigma^2 P_n \quad (3.18)$$

Donde ρ_k es el coeficiente de correlación entre el vector $(\eta_1, \dots, \eta_{n-k})$ y el vector desplazado (η_k, \dots, η_n) . La matriz Σ y consecuentemente P_n son matrices definidas positivas por tanto admiten raíz cuadrada. Sea $P_n^{1/2}$ la raíz cuadrada de P_n , o sea, la matriz que satisface la igualdad $P_n = P_n^{1/2} (P_n^{1/2})^T$. Entonces el vector $\bar{\eta}$ puede expresarse como (Koroliuk, 1984):

$$\bar{\eta} = \sigma P_n^{1/2} \bar{\xi} \quad (3.19)$$

Donde los componentes del vector $\bar{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ son variables aleatorias independientes con distribución normal estándar. La representación 3.19 permite reducir el problema del ruido coloreado a un problema de ruido blanco teniendo en cuenta el efecto de la matriz $P_n^{1/2}$. La siguiente proposición es el análogo de la Proposición 1 para el caso de RC gaussiano.

Proposición 2: Sea $x_i = a + \eta_i$; $i = 1 \dots n$ donde a es constante y η_i son variables aleatorias normales, no necesariamente independientes, de varianza σ^2 . Sea $\hat{\sigma}_n^2$ la varianza muestral observada y $\Sigma = \sigma^2 P_n$ y P_n la matriz de auto-correlación de la distribución conjunta $\bar{\eta} = (\eta_1, \dots, \eta_n)$. Entonces, si el valor propio γ más grande de la matriz P_n es menor que τ se cumple:

$$P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau \sigma^2) \leq c \frac{e^{-\left(\sqrt{\frac{\tau}{\gamma}} - 1\right)^2 n}}{\sqrt{4\pi n} \left(\sqrt{\frac{\tau}{\gamma}} - 1\right)} \quad (3.20)$$

Demostración

La desigualdad $\hat{\sigma}_n^2 > \tau \sigma^2$ es equivalente a $\|\bar{\eta}\|^2 > \tau \sigma^2 (n - 1)$. De (3.19) se tiene:

$$\|\bar{\eta}\|^2 \leq \sigma^2 \left\| P_n^{1/2} \right\|^2 \|\bar{\xi}\|^2 \quad (3.21)$$

Donde $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ son variables aleatorias independientes con distribución normal estándar. Luego si $\|\bar{\eta}\|^2 > \tau\sigma^2(n-1)$ obligatoriamente se cumple que:

$$\sigma^2 \|P_n^{1/2}\|^2 \|\bar{\xi}\|^2 > \tau\sigma^2(n-1) \quad (3.22)$$

Como se conoce $\gamma = \|P_n\| = \|P_n^{1/2}\|^2$, de donde se obtiene que si $\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2$ necesariamente se cumple $\|\bar{\xi}\|^2 > \frac{\tau(n-1)}{\gamma}$ y por tanto:

$$P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2) < P\left(\|\bar{\xi}\|^2 > \frac{\tau(n-1)}{\gamma}\right) \quad (3.23)$$

La variable $\|\bar{\xi}\|^2 = \xi_1^2 + \xi_2^2 + \dots + \xi_n^2$ sigue una distribución χ^2 con $(n-1)$ grados de libertad, por ello se tiene:

$$P\left(\|\bar{\xi}\|^2 > \frac{\tau(n-1)}{\gamma}\right) = 1 - P\left(\|\bar{\xi}\|^2 \leq \frac{\tau(n-1)}{\gamma}\right) \quad (3.24)$$

$$P\left(\|\bar{\xi}\|^2 > \frac{\tau(n-1)}{\gamma}\right) = 1 - H_{n-1}\left(\frac{\tau(n-1)}{\gamma}\right) \quad (3.25)$$

Aplicando ahora el Lema 1 (para $\kappa = \tau/\gamma$), de manera análoga a la Proposición 1, se obtiene que:

$$P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2) \leq c \frac{e^{-\left(\sqrt{\frac{\tau}{\gamma}}-1\right)^2 n}}{\sqrt{4\pi n}\left(\sqrt{\frac{\tau}{\gamma}}-1\right)} \quad (3.26)$$

Con lo que queda demostrado.

La Proposición 2 establece igualmente una condición necesaria para la estacionariedad. Para su uso debe asegurarse escoger el valor de τ de manera que el cociente τ/γ sea mayor que 1. En este caso si para un n “suficientemente grande” se satisface $\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2$ entonces puede asegurarse que con una alta probabilidad el conjunto de datos no representa una señal en EE. Por otro lado, la presencia de auto-correlación en el ruido afecta la velocidad con que converge a cero la probabilidad $P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2)$. En la figura 3.3 se muestran los valores estimados de la probabilidad del evento complementario

$P(\hat{\sigma}_n^2 \leq \tau\sigma^2) = 1 - P(\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2)$ como función del número de muestras n , para $\tau = 1,71$ y asumiendo que $\gamma = 1,3$.

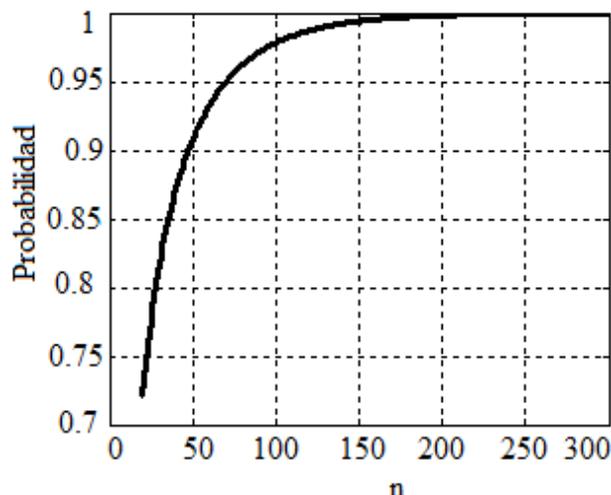


Figura 3.3: Criterio de selección de ancho de ventana ante RC

Puede apreciarse que la probabilidad $P(\hat{\sigma}_n^2 \leq \tau\sigma^2)$ es prácticamente igual a uno sólo para valores de n mayores que 160 a diferencia del ejemplo de ruido blanco en que ya a partir de $n = 70$ se logra la convergencia.

Una estimación adecuada para el mayor valor propio γ de la matriz de auto-correlación $P_n = (p_{ij})$ viene dada por $\gamma < \max_i \sum_j |p_{ij}|$. En el anexo D los códigos en MATLAB del algoritmo dedicado a la estimación del factor de auto-correlación γ .

La no suficiencia de los criterios dados por las proposiciones 1 y 2 puede apreciarse en los ejemplos que se muestra en las figura 3.4 y 3.5 para las cuales se empleó $\tau = 1,71$.

Las figuras 3.4 y 3.5 muestran que pueden encontrarse segmentos en los que se cumpla la condición necesaria pero que contengan pequeñas zonas en ET. La causa radica en que en el segmento analizado predomina un sub-segmento mayor en EE y la influencia del sub-segmento en ET no es suficiente para elevar la varianza de la ventana por encima del umbral $1,71\sigma^2$. Este hecho indica que para detectar adecuadamente los EE se

necesita un paso adicional sobre los segmentos que se consideren candidatos. Este paso es el denominado como rectificación.

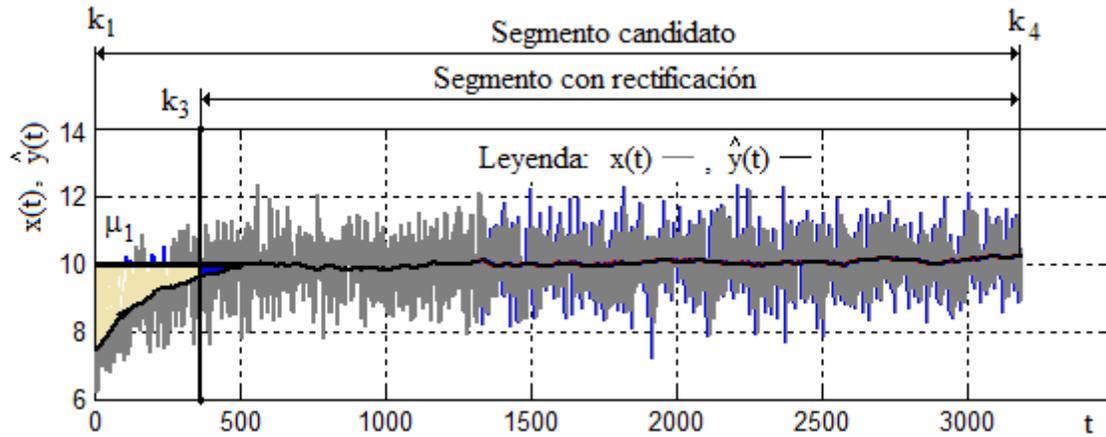


Figura 3.4: Rectificación de coordenadas al comienzo de la detección

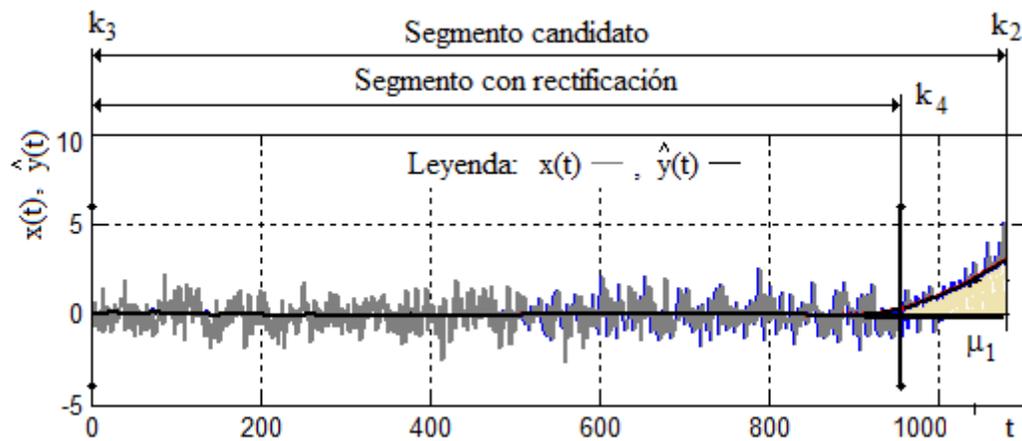


Figura 3.5: Rectificación de coordenadas al final de la detección

3.2.3 Criterios de selección basados en características de respuesta temporal

Partiendo de la relación existente entre señales y sistemas dinámicos, para fines de DEE, el criterio para la selección de la longitud de la ventana es fijar su valor a un número de muestras que sea igual o mayor que tres a cinco veces la constante de tiempo de la VP dividida por el período de muestreo. Ésta es la razón por la que ha sido necesaria la caracterización de la dinámica de los subprocesos fundamentales que componen el GV en la UGE. Así por ejemplo, si la constante de tiempo dominante es de 30 segundos, y el

período de muestreo es de dos segundos, entonces la longitud de la ventana deberá ser configurada entre $3 \times 30/2 = 45$ muestras a $5 \times 30/2 = 75$ muestras (Kelly & Hedengren, 2013).

Para fines de filtrado o suavizado de los registros, el criterio para la selección de la longitud de la ventana es fijar su valor a un número de muestras que sea equivalente igual o menor a la constante de tiempo de la VP dividida por el período de muestreo.

3.3 Estimación de la varianza del ruido

En el método de DEE propuesto, la varianza σ^2 del ruido que afecta la VP es clave. Dado que no siempre se conoce a priori cuál es su valor, se hizo necesario evaluar algunos métodos existentes para seleccionar al mejor. En (Leigh y otros, 2011) se hace un análisis detallado de diferentes algoritmos de estimación de varianza en el contexto de la reducción de RB en imágenes.

Una clase de estimadores hace uso de las características de la transformada de wavelet discreta (DWT). La desviación estándar del ruido σ que contamina una señal puede ser estimada a partir de la mediana de la desviación absoluta (MAD) de los coeficientes wavelets, lo cual se basa en la hipótesis de que la MAD de la banda de mayor frecuencia es proporcional a la desviación estándar del ruido (Donoho y Johnstone, 1994). El estimador que se obtiene es:

$$\hat{\sigma}_{MAD} = \frac{1}{0,6745} MAD(y_i^H) \quad (3.27)$$

donde y_i^H son los coeficientes wavelet de la banda de mayor frecuencia en la DWT. La operación MAD para un conjunto de datos X_i es definida como la mediana de las desviaciones absolutas de la mediana del conjunto, o sea:

$$MAD(X_i) = Median_i(|X_i - Median_j(X_j)|) \quad (3.28)$$

Este estimador es muy usado en los algoritmos para reducir el RB gaussiano en mediciones industriales (Cedeño y Trujillo, 2013). Sin embargo, si el ruido no es blanco su densidad espectral no es constante, y por tanto, este estimador no proporciona un valor correcto del nivel del ruido ya que el mismo sólo contiene información de la potencia del ruido en la frecuencia más alta. Si el ruido es estacionario y correlacionado se ha establecido que la varianza del ruido que afecta a los coeficientes wavelets depende del nivel de descomposición y la varianza de las primeras bandas puede ser estimada por la fórmula (3.27), reemplazando los coeficientes de la banda de mayor frecuencia por los coeficientes de la banda a analizar (Johnstone y Silverman, 1997; Johnstone, 1999). De esta forma se pueden obtener estimaciones del ruido correspondientes a diferentes frecuencias. Si se desconoce la densidad espectral del ruido, un estimador global razonable es, sin duda, la media aritmética de los estimadores obtenidos para cada banda. Si se incluyen, por ejemplo, las cuatro primeras bandas se obtiene el estimador para la desviación estándar del ruido contaminante, $\hat{\sigma}_{MADc}$, que se define como:

$$\hat{\sigma}_{MADc} = \frac{1}{4(0,6745)} \left(MAD(y_i^{H1}) + MAD(y_i^{H2}) + MAD(y_i^{H3}) + MAD(y_i^{H4}) \right) \quad (3.29)$$

donde y_i^{Hk} son los coeficientes wavelet de la banda k de la DWT ordenadas en orden decreciente de la frecuencia. Observe que la fórmula (3.29) representa la media aritmética de las estimaciones del ruido en las cuatro primeras bandas obtenidas por la fórmula (3.27).

Otra clase de técnicas de estimación de ruido usa las varianzas locales de la señal (Leigh y otros, 2011). Para ello a partir de un punto se toma una ventana de longitud impar con centro en el mismo y se calcula la varianza de los valores que caen dentro de la ventana. La ventana se desliza para cada punto de la señal de manera que se pueda obtener una

varianza local para cada valor de la señal. De esta forma, si la ventana se toma de longitud $2m + 1$, las varianzas locales serían:

$$Var_i = \frac{1}{2m + 1} \sum_{k=i-m}^{i+m} (X_k - \bar{X}_k)^2 \quad (3.30)$$

donde \bar{X}_i es la media de los valores de la ventana, o sea:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{2m + 1} \sum_{k=i-m}^{i+m} X_k \quad (3.31)$$

Obviamente, cuando el punto se encuentra cerca de los extremos de la señal, las sumatorias pueden no incluir todos los $2m+1$ valores. A partir de las varianzas locales se pueden definir los siguientes estimadores (Donoho y Johnstone, 1994):

$$\hat{\sigma}_{mean} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Var_i} \quad (3.32)$$

$$\hat{\sigma}_{max} = \sqrt{Max_i(Var_i)} \quad (3.33)$$

$$\hat{\sigma}_{min} = \sqrt{Min_i(Var_i)} \quad (3.34)$$

$$\hat{\sigma}_{med} = \sqrt{Median(Var_i)} \quad (3.35)$$

Debe señalarse que los estimadores basados en las varianzas locales dependen del ancho de la ventana deslizante. Si la ventana es muy pequeña puede que no capte la información del ruido en las frecuencias bajas. Por otro lado si la ventana es muy amplia la varianza local puede incluir demasiada información sobre la varianza de la señal base.

3.3.1 Selección del estimador de varianza del ruido: análisis comparativo

Para seleccionar cual estimador del nivel de ruido se utilizaría en el método sigma-gamma, se decidió realizar un experimento consistente en tomar una señal base

trapezoidal y generar a partir de ella 105 señales contaminadas con RB y 105 señales contaminadas con RC, y comparar la varianza del ruido estimado por cada método con la varianza real del ruido agregado. Las 105 señales se dividen en siete grupos de 15 señales que tienen niveles de ruido similares. La ventana para los algoritmos de varianzas locales se tomó con 13 puntos que fue el ancho de ventana que ofreció mejores resultados en las pruebas realizadas. Para los estimadores $\hat{\sigma}_{MADc}$ y $\hat{\sigma}_{MAD}$ se utilizó la DWT con la función madre Daubechies cuatro. En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran las desviaciones promedio del valor real obtenidas en cada grupo para el caso del RB y del RC. Se destaca en negritas los mejores valores.

Tabla 3.1: Desviaciones de los estimadores ante RB

	$\sigma^2 = 0,5$	$\sigma^2 = 0,25$	$\sigma^2 = 0,12$	$\sigma^2 = 0,09$	$\sigma^2 = 0,06$	$\sigma^2 = 0,03$	$\sigma^2 = 0,01$
$\hat{\sigma}_{mean}$	0,0246	0,0145	0,0069	0,0040	0,0006	0,0065	0,0175
$\hat{\sigma}_{med}$	0,0276	0,0155	0,0095	0,0081	0,0064	0,0040	0,0024
$\hat{\sigma}_{max}$	0,4542	0,3643	0,3029	0,2848	0,2856	0,2668	0,2644
$\hat{\sigma}_{min}$	0,4420	0,3190	0,2266	0,1925	0,1582	0,1120	0,0646
$\hat{\sigma}_{MADc}$	0,0131	0,0091	0,0062	0,0071	0,0057	0,0044	0,0023
$\hat{\sigma}_{MAD}$	0,0150	0,0083	0,0082	0,0060	0,0049	0,0041	0,0023

Como se puede apreciar de las tablas 3.1 y 3.2, los estimadores $\hat{\sigma}_{mean}$, $\hat{\sigma}_{med}$ y $\hat{\sigma}_{MAD}$ ofrecen buenos resultados para el caso del RB pero disminuyen sensiblemente su precisión en el RC mientras que el estimador $\hat{\sigma}_{MADc}$ muestra consistentemente buenos resultados tanto para RB como para RC, llegando a estimar el ruido real con un error relativo no mayor al 1,5% en el RB y no mayor al 3,5% en el RC. Al someterlo a la prueba de significación estadística ANOVA (véase tabla 3.3) el mejor estimador para cualquier tipo de ruido y PSNR es el $\hat{\sigma}_{MADc}$.

Tabla 3.2: Desviaciones de los estimadores ante RC

	$\sigma^2 = 0,5$	$\sigma^2 = 0,25$	$\sigma^2 = 0,12$	$\sigma^2 = 0,09$	$\sigma^2 = 0,06$	$\sigma^2 = 0,03$	$\sigma^2 = 0,01$
$\hat{\sigma}_{mean}$	0,1228	0,0825	0,0549	0,0361	0,0334	0,0187	0,0079
$\hat{\sigma}_{med}$	0,1346	0,0902	0,0629	0,0427	0,0427	0,0298	0,0171
$\hat{\sigma}_{max}$	0,5167	0,4274	0,3505	0,3167	0,3241	0,2862	0,2827
$\hat{\sigma}_{min}$	0,5289	0,3938	0,2695	0,2229	0,1966	0,1362	0,0769
$\hat{\sigma}_{MADc}$	0,0324	0,0214	0,0152	0,0140	0,0102	0,0083	0,0059
$\hat{\sigma}_{MAD}$	0,1926	0,1466	0,1051	0,0811	0,0886	0,0757	0,0232

Tabla 3.3: Resultados de prueba de significación estadística con técnica ANOVA

σ^2	RB		RC	
	Significativa- mente mejores	No hay diferencias significativas	Significativa- mente mejores	No hay diferencias significativas
0,01	$\hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{MADc}, \hat{\sigma}_{MAD}$	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{max}, \hat{\sigma}_{min}$	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{MADc}$	$\hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{min}, \hat{\sigma}_{MAD}$
0,03	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{MADc}, \hat{\sigma}_{MAD}$	$\hat{\sigma}_{max}, \hat{\sigma}_{min}$	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{MADc}$	$\hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{min}, \hat{\sigma}_{MAD}$
0,06	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{MADc}, \hat{\sigma}_{MAD}$	$\hat{\sigma}_{max}, \hat{\sigma}_{min}$	$\hat{\sigma}_{MADc}$	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{min}, \hat{\sigma}_{MAD}$
0,09	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{MADc}, \hat{\sigma}_{MAD}$	$\hat{\sigma}_{max}, \hat{\sigma}_{min}$	$\hat{\sigma}_{MADc}$	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{min}, \hat{\sigma}_{MAD}$
0,12	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{MADc}, \hat{\sigma}_{MAD}$	$\hat{\sigma}_{max}, \hat{\sigma}_{min}$	$\hat{\sigma}_{MADc}$	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{min}, \hat{\sigma}_{MAD}$
0,25	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{MADc}, \hat{\sigma}_{MAD}$	$\hat{\sigma}_{max}, \hat{\sigma}_{min}$	$\hat{\sigma}_{MADc}$	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{min}, \hat{\sigma}_{MAD}$
0,5	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{MADc}, \hat{\sigma}_{MAD}$	$\hat{\sigma}_{max}, \hat{\sigma}_{min}$	$\hat{\sigma}_{MADc}$	$\hat{\sigma}_{mean}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{med}, \hat{\sigma}_{min}, \hat{\sigma}_{MAD}$

Por lo que la conclusión es que la estimación de la fórmula (3.29) resultó más exacta que las restantes y más robusta cuando el ruido no es blanco. En el anexo D aparecen los códigos en MATLAB para estimar la varianza del ruido en las mediciones $\hat{\sigma}^2$.

3.4 Algoritmo para segmentación

El algoritmo para la segmentación se basa en la evaluación sucesiva de la condición de desviación estándar de umbral sobre cada vector de datos dentro de la ventana deslizante.

Algoritmo 1 Segmentación (componente sigma) basada en cálculo de desviación estándar (σ)

Entrada: Vector con los datos de la serie temporal $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, tamaño de los datos N , anchos mínimo L_{min} y máximo L_{max} de la ventana deslizante. El criterio de selección de la longitud L_{min} inicial de la ventana es como se indica en el epígrafe 3.2.3. El valor de L_{max} se sugiere establecer un 10 % por encima de L_{min} .

Salida: Lista LS con los pares de coordenadas (k_1, k_2) de los segmentos candidatos a estado estacionario.

1. Inicialización:

- 1.1. Establecer la desviación estándar del ruido σ (si es conocida de alguna forma “a priori”) o tomarla igual a la estimación $\hat{\sigma}_{MADc}$ (ver fórmula (3.29))
- 1.2. $w_1 = 1$ (Inicio de la ventana deslizante)
- 1.3. $LS = \emptyset$. (La lista de segmentos candidatos inicialmente está vacía)
- 1.4. La longitud inicial de la ventana L se toma igual a L_{min}

2. Detección de un segmento candidato:

- 2.1. $w_2 = w_1 + L_{min}$. Si $w_2 > N$ **finalizar**
- 2.2. Calcular la varianza muestral $\hat{\sigma}^2$ de la ventana definida por las coordenadas (w_1, w_2) .

2.3. Si $\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2$ se desecha el segmento, pues con una alta probabilidad está en estado transitorio. Se procede entonces a incrementar w_1 y saltar al paso 2.1 para recomenzar otra búsqueda. En caso contrario se encontró un segmento candidato y se pasa al punto 3.

3. Ampliación del segmento candidato

- 3.1. $k_1 = w_1$ (Con esto se marca el inicio del segmento candidato)
- 3.2. Si $L < L_{max}$ entonces $L = L + 1$ en caso contrario incrementar w_1
- 3.3. $w_2 = w_1 + L$. Si $w_2 > N$ entonces $LS = LS + \{[k_1, N]\}$ y **finalizar**
- 3.4. Calcular la varianza muestral $\hat{\sigma}_n^2$ de la ventana definida por las coordenadas (w_1, w_2) .
- 3.5. Si $\hat{\sigma}_n^2 > \tau\sigma^2$, entonces $k_2 = w_2 - 1$; $LS = LS + \{[k_1, k_2]\}$; $w_1 = w_2$ y salta a 2.1.
- 3.6. Saltar a 3.2.

3.5 Algoritmo para rectificación de coordenadas y verificación de tolerancia

La formalización del algoritmo de rectificación y verificación es la siguiente:

Algoritmo 2: Rectificación de coordenadas de segmentos candidatos y verificación de la tolerancia de la media respecto a la tendencia.

Entrada: Vector con los datos de la serie temporal $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, lista de segmentos candidatos LS , máximo error permitido en la rectificación e_R , máximo error permitido en la verificación e_V .

Salida: Lista refinada de los segmentos candidatos.

1. Para cada segmento candidato $[k_1, k_2]$

1.1. Calcular el vector $\hat{y}(t)$ mediante medias móviles.

1.2. Rectificación de la primera coordenada:

- 1.2.1. Calcular la media μ_1 del vector X
- 1.2.2. Si $|\hat{y}(k_1) - \mu_1| < e_R$ saltar a 1.3. (Se determina k_3)
- 1.2.3. Incrementar k_1 . Si $k_1 = k_2$ eliminar el segmento candidato de la lista y continuar el lazo 1. En caso contrario saltar a 1.2.2

1.3. Rectificación de la segunda coordenada:

- 1.3.1. Si $|\hat{y}(k_2) - \mu_1| < e_R$ saltar a 1.4. (Se determina k_4)
- 1.3.2. Decrementar k_2 . Si $k_1 = k_2$ eliminar el segmento candidato de la lista y continuar el lazo 1. En caso contrario saltar a 1.3.1

1.4. Verificación de tolerancia:

- 1.4.1. Recalcular la media del vector X en el intervalo $[k_3, k_4]$ obteniendo μ_2
- 1.4.2. Para cada $k \in [k_3, k_4]$ comprobar si $|\hat{y}(k) - \mu_2| \geq e_V$. Si es así, para algún k , eliminar el segmento candidato de la lista y continuar el lazo 1. En caso contrario continuar el lazo 1

Para configurar al parámetro e_R se toma en cuenta su escalado respecto a μ_1 . De $|\hat{y}(k) - \mu_1| < e_R$, su significado está en $|\hat{y}(k) - \mu_1| = \frac{e_R[\%]}{100} \mu_1$. Se sugiere emplear entre el (2 – 10) %. De modo análogo, la configuración del parámetro e_V depende de la tolerancia prescrita en la aproximación a μ_2 respecto a $\hat{y}(k)$ entre $[k_3, k_4]$.

3.6 Detector de coincidencias

Con el método propuesto, la DEE se realiza para cada una de las variables seleccionadas. La determinación de las coordenadas de los intervalos de tiempo coincidentes para un conjunto de variables requiere del diseño de un algoritmo adicional. Hay que imponer la

restricción de dar como válidos aquellos segmentos cuyos intervalos de tiempo satisfagan una duración mínima t_{min} . La razón es de índole física, pues un EE existe en un sistema físico cuando el conjunto de variables que caracterizan sus entradas y salidas se mantienen en condición de estacionariedad en un lapso de tiempo más largo que la constante de tiempo mayor que pueda tener. El diseño es como sigue:

Algoritmo 3: Detección de los segmentos de EE en coincidencia multivariable.

Entrada: Listas LS_1, LS_2, \dots, LS_n de segmentos en estado estacionario correspondientes a las n variables a analizar y el tiempo mínimo en estado estacionario t_{min} .

Salida: Lista LS_C de los segmentos de coincidencia en estado estacionario de las n variables.

1. Inicialización

1.1. Se toma $LS_C = LS_1$ y $i = 2$.

2. Lazo principal

2.1. Si $i \geq n$ **finalizar** retornando LS_C .

2.2. La lista auxiliar LS_T se inicializa como una lista vacía ($LS_T = \emptyset$).

2.3. Para cada segmento $[k_1, k_2] \in LS_C$ y para cada segmento $[h_1, h_2] \in LS_i$:

2.3.1. Si $k_1 > h_2$ ó $h_1 > k_2$ los segmentos no tienen puntos comunes por tanto se continúa con el lazo 2.3, en caso contrario ir a 2.3.2

2.3.2. Si $\min(k_2, h_2) - \max(k_1, h_1) < t_{min}$ el segmento de coincidencia no tiene la duración necesaria y por tanto se continúa con el lazo 2.3, en caso contrario ir a 2.3.3

2.3.3. $LS_T = LS_T + \{[\max(k_1, h_1), \min(k_2, h_2)]\}$

2.4. $LS_C = LS_T$

2.5. Se incrementa i y se regresa a 2.1

En el anexo D pueden ser consultados los códigos en MATLAB de cada uno de los algoritmos que componen al método.

3.7 Aspectos para evaluar un método y verificar un algoritmo de detección de coincidencia

Para la evaluación comparativa del desempeño de métodos para la DEE se introducen los siguientes tres aspectos:

- (i) Definición de formas de ondas base que estén acorde a los regímenes de operación de los procesos sobre los que se aplicará el método y construirle sus respectivas señales binarias de referencia que codifican sus intervalos de EE y ET.
- (ii) Generación de las señales de ensayo adicionándole RB y RC de distribución normal de diferentes varianzas y auto-correlación.
- (iii) Aplicación de los métodos y determinación de los errores por tipo.

Para verificar el desempeño correcto del algoritmo cuatro se propone el diseño de secuencias de pares de coordenadas con diferentes estructuras de posicionado entre unas y otras. Su resultado debe coincidir con la lista de coordenadas previamente conocida.

3.8 Procedimiento para la monitorización del desempeño de la operación

Desde el punto de vista de la transformación de las mediciones y el ordenamiento en tiempo real de sus valores de EE (Blanco y otros, 2012a) las etapas siguientes son claves:

- (i) la DEE con delimitación de comienzo y de fin de segmentos (fecha y tiempo).
- (ii) el cálculo de la desviación por variable entre cada valor actual respecto a su valor esperado (que caracteriza a un buen desempeño relativo de la operación),
- (iii) un sistema de datos memorizados que permita salvar las sucesiones de las desviaciones detectadas con su correspondiente fecha, tiempo y duración.

Desde el punto de vista del alcance y objetivo de la monitorización del desempeño de la operación (Blanco y otros, 2013), las etapas siguientes son claves:

- (i) Caracterización de las degradaciones típicas y esenciales que afectan el correcto desempeño de la operación de la UGE.
- (ii) Selección de las variables claves.
- (iii) Definición del detector de coincidencias (DC).
- (iv) La asociación tanto de las desviaciones detectadas a sus posibles causas, así como también, entre las variaciones de ellas a sus posibles causas.

Como resultado de un análisis interdisciplinario el procedimiento propuesto consta de:

- (i) una estructura de cómputo (como la indicada en la figura 3.6) que consta de dos pasos para la transformación de las mediciones:
 - (i.1) Un método para la Detección de Estados Estacionarios
 - (i.2) Detección por variable de las desviaciones respecto a sus valores de referencia de buen comportamiento relativo y su agrupamiento por horizontes de tiempo.
- (ii) Criterios y reglas para la configuración de los métodos de cada paso.

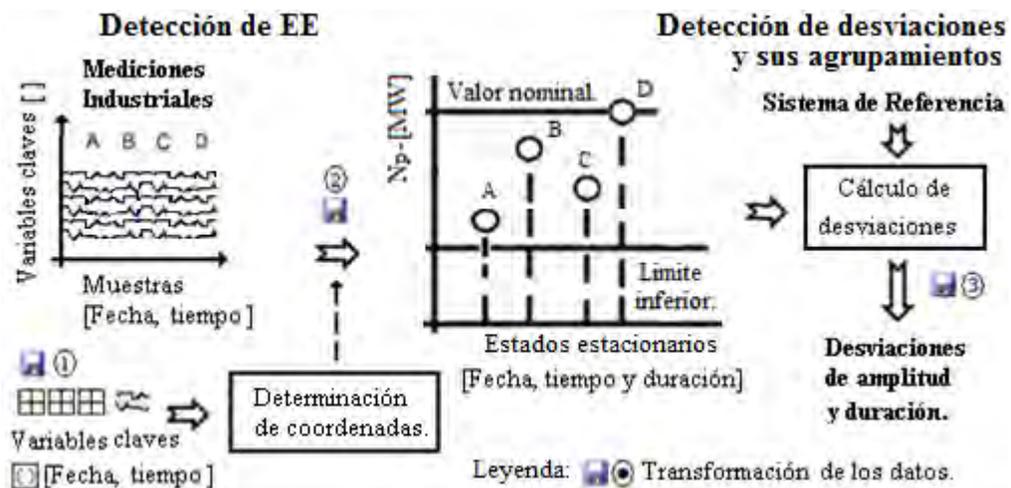


Figura 3.6: Esquema de cómputo para la monitorización a largo plazo

3.9 Criterio de selección de variables

En la selección de las variables, interviene el conocimiento de los factores que favorecen la activación sistemática de los mecanismos de degradación en los subprocesos de la generación de vapor en la UGE y las mediciones sobre las cuales se manifiestan sus efectos y que típicamente están instrumentadas (Seborg y otros, 2004). A partir de aspectos como: (i) el análisis de los subprocesos que esencialmente implementan la generación de vapor de la UGE constatado en (Rayaprolu, 2009; Peña y otros, 2010; Cronvall, 2011; Vazquez y otros, 2012b) y (ii) de los procedimientos que se toman como base para la evaluación global de este subproceso obtenidos de (ASME, 1998; ASME, 2010) se proponen los criterios siguientes atendiendo a:

- (i) Operación específica de subprocesos. Consúltese la tabla E.1 del anexo E.
- (ii) Índices de sobreconsumo (Vázquez y otros, 2010). Ver la tabla E.2 del anexo E.
- (iii) Relaciones de estequiometría y de evaporación (Branislav y Radisa, 2011). Consúltese la figura E.1 del anexo E.

La relación de las variables (y su notación) puede ser consultada en el Anexo F.

3.10 Detección y agrupamiento de desviaciones

Para la detección por variable de las desviaciones en esta investigación: (i) se fundamenta una estructura de curva de buen desempeño relativo, (ii) se formulan los pasos para su construcción por variable y para la determinación de sus desviaciones en cada punto de operación en potencia, y finalmente, (iii) se aborda el diseño del algoritmo del paso anterior y el algoritmo para agrupar en ventanas las desviaciones.

3.10.1 Estructura de curva de buen desempeño relativo

En la determinación de las desviaciones que se producen sobre cada variable por efecto de las perturbaciones de lento desarrollo es necesario contar con una representación analítica, tal que, para cada potencia, se pueda determinar cuál debería ser el valor esperado si la operación transcurriera bajo condiciones de buen desempeño. A ésta se le denomina curva de buen desempeño relativo, tal y como existe precedente en (Tzu-Chi y otros, 2011; Huwang y otros, 2014).

Una vez que se dispone de valores de EE de cada una de las variables vinculadas a los de la potencia, se puede establecer una función por variable.

El próximo aspecto para construirla es definir cuál es su forma a partir de la disponibilidad de pocos nodos. Las características del control de planta completa en el GV es del tipo auto-optimizado con un comportamiento estático del tipo óptima plana, es decir, la regulación de sus variables no se enfrenta a puntos máximos ni mínimos (Skogestad, 2004; Downs y Skogestad, 2011), por lo que es un proceso bien comportado (well behaved) (Howard y Cooper, 2010; Caro y otros, 2013; Soleimani y Govindan, 2014). La observación de las formas de las curvas de buen desempeño de sus variables respecto a la potencia ofrecida por el fabricante revela que es de monotonía y un nivel de curvatura que admite conformación mediante polinomios cúbicos.

Una solución para la conformación de lo desconocido es la estimación por interpolación entre nodos. La estructura de la curva tiene que satisfacer que la colocación de cada uno de ellos entre dos nodos sucesivos sea una función C^n en la preservación de la monotonía entre los datos de EE que interpola. C^n denota al conjunto de las funciones n -veces diferenciables, tales que la derivada de orden n es continua y la propia función es también continua. Así, C^1 se refiere a una función interpolante tal que la función que resulta de

su primera derivada preserva la continuidad. C^0 es simplemente el conjunto de las funciones continuas, también denotado por C (Abbas y otros, 2011; Abbas y otros, 2012; Chapra, 2012). La solución del problema de la preservación de la forma de los datos a problemas industriales muestra ejemplos de aplicación de estas técnicas en la industria de potencia (Fahrmeir y otros, 2013; Thurner y otros, 2014).

3.10.2 Construcción de la curva de buen desempeño

Sean de r - Y_i variables de procesos seleccionadas:

$$Y_1, Y_2, \dots, Y_r \quad (3.36)$$

Sea una muestra de series de tiempo de cada una de ellas:

$$y_{1k}, y_{2k}, \dots, y_{rk} \quad k = 1, \dots, w \quad (3.37)$$

Se le detectan p - EE en coincidencia multivariable. Cada uno de sus p -valores medios tiene asociando un elemento D_T de su fecha inicial y duración.

$$Y_{1T1}, Y_{2Tj}, \dots, Y_{iTj} \quad j = 1, \dots, r \quad i = 1, \dots, p \quad (3.38)$$

$$D_T = \{D_1, D_2, \dots, D_p\} \quad (3.39)$$

Para cada una de las r - variables de procesos se dispone de q valores medios adquiridos a continuación del arranque de la UGE después de un mantenimiento considerándose de buen desempeño relativo. Se identifican con el subíndice 'o':

$$Y_{1oi}, Y_{2oi}, \dots, Y_{joi} \quad j = 1, \dots, r \quad i = 1, \dots, q \quad (3.40)$$

A cada uno de los cuales le corresponde el valor medio en potencia $N_{p_{oi}}$:

$$N_{p_{o1}}, N_{p_{o2}}, \dots, N_{p_{oq}} \quad (3.41)$$

N_{p_o} está acotado por $[N_{p_{oMIN}}, N_{p_{oMAX}}]$.

El procedimiento de interpolación para cada una de las r - Y_i y la potencia con polinomios cúbicos de Hermite $H_i(N_{p_o})$ es común. Para la variable Y_{1oi} , la construcción

de cada uno de los tramos hasta completar a los $q - 1$ nodos es:

$$Y_{1oi} = H_{y1i} \left(N_{p_o} \right) \quad i = 1, \dots, q - 1 \quad (3.42)$$

Siendo $H_{y1} = (H_1, H_2, \dots, H_{q-1})$ la curva de buen desempeño relativo de Y_{1o} . Las interpolaciones de las $r - Y_i$ se compacta con la siguiente función vectorial:

$$\vec{H}_y = (H_{y1}, H_{y2}, \dots, H_{yr}) \quad (3.43)$$

Con el comando **pchip** (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) del paquete MATLAB®, la función interpolante que resulta, preserva la monotonía con continuidad C^1 (Abbas, et al., 2012). Con este se puede construir, para cada variable Y_1 su curva H_{y1} .

3.10.3 Cálculo de las desviaciones

Sea N_{p_a} el valor medio de la variable potencia correspondiente al ‘a – EE’ detectado, el cálculo del valor de buen desempeño relativo de cada una de las $r - Y_i$ variables mediante su función H_{yi} es como sigue:

$$Y_{ia} = H_{yi} \left(N_{p_a} \right) \quad i = 1, \dots, r \quad (3.44)$$

Se define a δY_{iTj} como la desviación en el T_j -intervalo de EE de la variable Y_i :

$$\delta Y_{iTj} = Y_{iTj} - H_{yi} \left(N_{p_{Tj}} \right) \quad i = 1, \dots, r ; \quad j = 1, \dots, p \quad (3.45)$$

Y_{iTj} : es el valor medio detectado en la variable Y_i en el T_j -intervalo de EE, pudiendo ser alguno de los valores de los $p - EE$ indicados en (3.38).

$Y_{iTj} = H_{yi} \left(N_{p_{Tj}} \right)$: es el valor medio de buen desempeño de la variable Y_i en T_j .

Cada Y_{iTj} (y por ende cada δY_{iTj}) tiene asociado su atributo de fecha inicial y duración D_{Tj} , lo cual es premisa para poder realizar sus agrupamientos.

El comando **ppval** (Evaluate piecewise polynomial) permite predecir el valor de Y_1 mediante la curva de buen desempeño relativo H_{y1} (previamente construida con **pchip**).

3.10.4 Algoritmos para la detección de desviaciones y su agrupamiento

A continuación se presentan los algoritmos diseñados para la detección de desviaciones y su agrupamiento.

Algoritmo 4: Detección de desviaciones

Entrada: Vector con los valores medios de variables seleccionadas con sus potencias (cercano al arranque por mantenimiento corrector de la UGE).

Salida: Tabla con las desviaciones por variable, su potencia y su fecha.

1. Cargar vectores de la variable a analizar y la potencia que servirá como referencia.
- 1.2. Asignarle un nombre al archivo de interpolación de acuerdo a las variables
2. Crear polinomio por tramos $H_n(x)$ que sea cúbico en cada sub-intervalo $[x_{(i-1)}, x_i]$ cumpliendo con 1ra derivada $H_n'(x)$ lineal en los puntos $\{x_0, \dots, x_n\}$ (interpolación cúbica de Hermite).
3. Cargar vectores de las mediciones actuales de las mismas variables del punto 1.
4. Utilizando el polinomio de interpolación $H_n(x)$ obtenido en punto 2, calcular para cada valor de potencia el valor esperado de la variable bajo análisis.
5. Restar el valor esperado de la variable con el valor medido para obtener su desviación.
6. Tabular los resultados.

En el diseño del algoritmo para la agrupación de desviaciones se define como base de datos reducida (BDR) a la que se dispone con un conjunto de valores medios de los EE para su ensayo fuera de línea.

Algoritmo 5: Agrupación de desviaciones

Entrada: Arreglo de vectores con los valores medios de las variables seleccionadas y la potencia (BDR) y la configuración de cada grupo, m , y su unidad base (días/semanas/meses/años).

Salida: Agrupamientos por fecha.

1. Calcular tamaño de los grupos en días.

Si Opción marcada=días $\rightarrow d = m$ Saltar a punto 2

Si Opción marcada=semanas $\rightarrow d = m * 7$ Saltar a punto 2

Si Opción marcada=meses $\rightarrow d = m * 30$ Saltar a punto 2

Si Opción marcada=años $\rightarrow d = m * 365$

2. Codificar todas las fechas de la BDR un código numérico asignándole a cada mes su número en el calendario: código= [año, mes, día, hora, minutos, segundos].

3. Conformación de grupos

3.1. D_s = código fecha inicial BDR; D_e = código fecha final BDR;

3.2. Fijar condiciones iniciales: $i = 1$. $D_{si} = D_s$

3.3. $D_{ei} = D_{si} + d$ **fin grupo.**

3.4. Si $D_{ei} > D_e$ **finalizar**

3.5. Nuevo grupo. $i = i + 1$.

3.6 $D_{si} = D_{ei-1} + 1$;

3.7 Saltar a 3.3

4. Recuperar estructura de fechas a partir de código sustituyendo número en el calendario por caracteres correspondientes a cada mes.

En el anexo D pueden ser consultados los códigos de los algoritmos para la detección y agrupamiento de desviaciones por variables.

Conclusiones del capítulo

Con el objetivo de ofrecer una solución al diseño y explotación de sistemas de monitorización del desempeño de la operación ante perturbaciones de lento desarrollo en procesos industriales, en este capítulo se propuso: un nuevo método y un procedimiento, obteniéndose los siguientes resultados:

- (i) Se mejoró la discriminación de ET en la zona de transición de los métodos de DEE basados en comparación con desviación estándar de umbral, al añadirle al método propuesto un paso basado en la extracción de tendencia sobre cada segmento candidato,
- (ii) Se dotó al método de DEE de un criterio para la sintonía de la desviación estándar de umbral al seleccionar un estimador de la varianza capaz de operar ante ruidos de diferentes PSNR y FAC,
- (iii) Se ofreció una vía de comprobar un algoritmo que determina coincidencias entre segmentos de EE proponiendo secuencias con diferentes posicionados de intervalos de EE y ET por VP.
- (iv) Se dotó al procedimiento de un soporte con integración interdisciplinaria al incluirle: (i) una estructura de cómputo, (ii) métodos para cada uno de los pasos, así como, (iii) los criterios y las reglas que se requieren para su aplicación.
- (v) Se ofreció una solución de estructura de reproducción de curva de buen desempeño por variable respecto a la potencia para una operación de carga base, al proponer su conformación con tipo de función C^1 , interpolando con preservación de la monotonía, sus nodos de mediciones de EE con polinomios cúbicos de Hermite.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DEL MÉTODO Y APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

En este capítulo se evalúa estadísticamente el desempeño del método propuesto en comparación con los métodos de Rhinehart (R) y de Jeff (J). Se constata la efectividad del procedimiento para la monitorización del desempeño de la operación al aplicarlo, bajo diferentes criterios y plazos de observación, a un GV y a un sobrecalentador de techo simulado.

4.1 Plataforma de experimentación para la evaluación comparativa del método

Aquí se implementan los aspectos propuestos en el epígrafe 3.7. En la evaluación de los métodos sobre un registro industrial, al no existir la señal base para tomar referencia en el cálculo de los errores tipo I y II se realiza una DEE manualmente.

En la definición de las formas de ondas bases para las señales sintéticas se tuvo en cuenta la similitud en la dinámica de los procesos químicos y del GV (véase epígrafe 1.2). Los EE de los regímenes de la operación de ambos tipos de procesos transcurren entre transiciones que pueden ser modeladas por exponenciales y por rampas. Este escenario de onda base es similar al empleado por los autores de los métodos R y J en sus ensayos respectivos, por esta razón se utilizan los parámetros que cada uno sugiere para aplicar su método.

4.1.1 Definición de las señales bases

Se proponen las siguientes dos formas de señales bases:

(i) Forma exponencial generada como la respuesta de un sistema lineal de primer orden, con constante de tiempo de 200 s, a una excitación de cambio en escalón. Su caracterización en segmentos de muestras de EE y ET se muestra en la figura 4.1. La duración considerada para ET es de 3 veces la constante de tiempo. Su ecuación es:

$$y = \begin{cases} 0, & 1 \leq t < 999 \\ 10(1 - e^{-t/200}) & 1000 \leq t < 4467 \end{cases} \quad (4.1)$$

(ii) Una forma trapezoidal (véase figura 4.2), cuyas pendientes representan la máxima velocidad de subida o bajada de carga de la UGE que está condicionada por los tiempos de la respuesta del GV. Para el caso de la unidad dos de la termoeléctrica de estudio, la pendiente es de 4,5 MW/min (0,075 MW/s). Ambos segmentos de ET tienen 131 muestras. La ecuación que genera esta serie temporal es la siguiente:

$$y = \begin{cases} 0, & 1 \leq t < 1201 \\ 0,075t, & 1202 < t < 1333 \\ 10, & 1334 < t < 3134 \\ -0,075t, & 3135 < t < 3267 \\ 0, & 3268 < t \leq 4467 \end{cases} \quad (4.2)$$

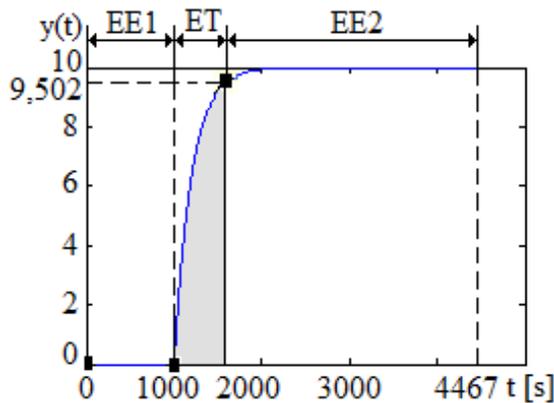


Figura 4.1: Serie temporal exponencial

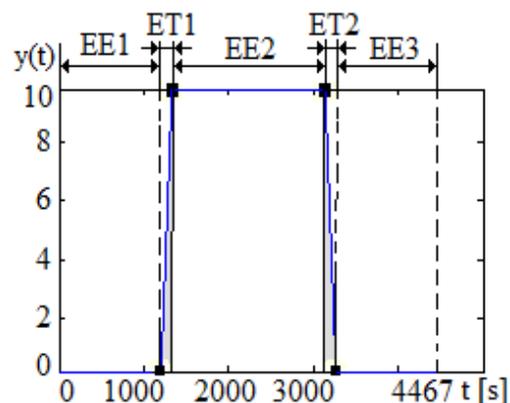


Figura 4.2: Serie temporal trapezoidal

Las ondas bases tienen 4467 muestras. Esta longitud permite distribuir los intervalos de tiempo asignados para estados estacionarios y estados transitorios.

4.1.2 Generación de las señales de ensayo

Las señales de ensayo se obtienen contaminando cada señal base con ruido de diferentes características espectrales y amplitud. Para ello, se genera una base de datos con vectores de ruidos que contiene RB gaussiano, con los siguientes valores de varianza: $\sigma^2 = 0,01, \sigma^2 = 0,03, \sigma^2 = 0,06, \sigma^2 = 0,09, \sigma^2 = 0,12, \sigma^2 = 0,25$ y $\sigma^2 = 0,5$. La generación de RC se realiza inyectando RB a un filtro ARMA (1,1) representado por la siguiente función de transferencia (Chaparro, 2011):

$$F(z) = \frac{1 + \theta_1 z^{-1}}{1 + \varphi_1 z^{-1}} \quad (4.3)$$

Donde θ_1 es el parámetro de la componente de media móvil del filtro (Theta) y φ_1 el parámetro de la componente auto-regresiva del filtro (Phi).

Para la generación del RC se emplean tres valores de φ_1 (-0,7, -0,8, -0,85) y un valor de $\theta_1 = -0,5$. Para cada valor de varianza se generan 15 vectores de RC, de los cuales cinco son para cada valor del parámetro φ_1 . La base de datos de ruidos está compuesta por 210 de vectores, de ellos 105 vectores de RB y 105 vectores de RC.

El efecto del filtro ARMA en la auto-correlación entre muestras puede apreciarse en la figura 4.3, con ayuda del comando de MATLAB ® **autocorr**. En la primera fila se muestran cada una de las FAC para RB y en la segunda fila, la correspondiente a RC de varianza similar.

Para las pruebas de evaluación comparativa de los métodos se dispone de 420 señales ensayo. Debe señalarse que como el valor máximo de las dos señales bases es diez, se

obtiene una PSNR entre 23 dB y 40 dB, lo que es consistente con los niveles de ruidos en los registros industriales de diferentes mediciones del proceso bajo investigación.

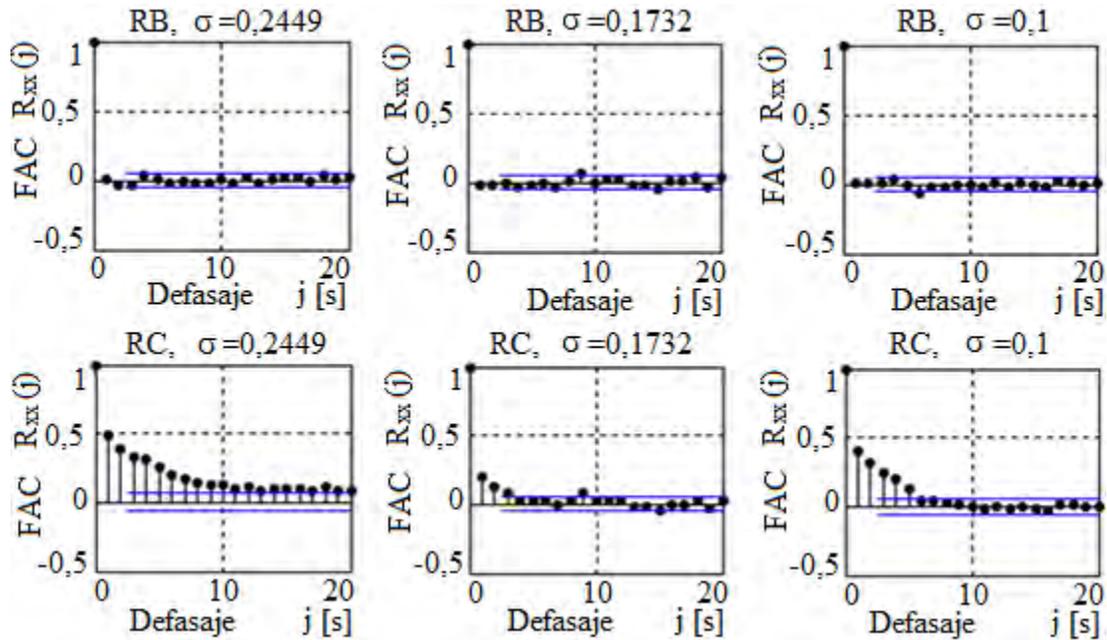


Figura 4.3: Ejemplos de funciones de auto-correlación de ruidos sintéticos

4.1.3 Configuración de los algoritmos

En la configuración del ancho de la ventana deslizante se decidió tomar 638 y de 300 para la exponencial y trapezoidal respectivamente. Estos valores se deben a tomar en cuenta el criterio de tres veces la constante de tiempo, y que el resto entre el tamaño del vector de muestras y la posición de ventanas a paso fijo del método de J fuera mínimo.

El método sigma-gamma requiere configurar cinco parámetros. De estos; tres (L_{min} , L_{max} y L_f) toman valores naturales correspondientes al número de muestras y dos de ellos son magnitudes de error (e_R y e_V). Los valores fijos configurados son:

- i. Para respuesta a escalón: $L_{min} = 638$, $L_{max} = 700$, $L_f = 100$, $e_R = 0,2$ y $e_V = 0,8$
- ii. Para señal trapezoidal: $L_{min} = 300$, $L_{max} = 330$, $L_f = 100$, $e_R = 0,2$ y $e_V = 0,8$

Para el método J se requiere configurar a tres parámetros: L (ancho de ventana), t_{crit}^m (Valor de umbral crítico inferior de Student) y t_{crit}^M (Valor de umbral crítico superior de Student). La ventana se desliza en L pasos. Sus parámetros se configuran en los siguientes valores:

Para la respuesta a un escalón: $L=638$. Asimismo, como sugieren sus autores, $t_{crit}^m = 2$ y $t_{crit}^M = 3$.

Para la señal trapezoidal: $L=300$, $t_{crit}^m = 2$ y $t_{crit}^M = 3$.

Los parámetros t_{crit}^m y t_{crit}^M son los sugeridos por sus autores (Kelly y Hedengren, 2013). En la página 328, segunda columna, tercer párrafo se indica que los valores de 2,0 y 3,0 representan los niveles de aceptación de 5 % y del 0,5 % de tolerancia respectivamente. El método R requiere configurar a cinco parámetros. La sugerencia de sus autores para los filtros es: $\lambda_1 = 0,05$, $\lambda_3 = 0,05$, $\lambda_2 = 0,05$ y para clasificar la ubicación de la muestra en EE o ET, se indica configurar a su estadígrafo R como: $R_{inf} = 0,8$ y $R_{sup} = 1,3$. Puede ser constatado en (Neha y otros, 2010), en la página 889, 2da columna y aseguran una aceptación de EE a un nivel de confianza superior al 99,99 %.

4.2 Comparación de los métodos

En las tablas 4.1 - 4.4 se reportan los resultados de los errores promedio obtenidos en las pruebas realizadas. Se destaca en negritas los mejores valores. A simple vista se revela que el método R, tal y como su autor ha indicado, sólo es aplicable si existe certeza de que el ruido es blanco. Al método propuesto se le denota indistintamente, además por el nombre de la aplicación de implementación IME (Industrial Multi-variate Explorer) La figura 4.4 muestra las gráficas de los errores promedio totales de cada método con respecto a la varianza del ruido. Se revela que los tres métodos son relativamente estables

al incremento del nivel del ruido presente en las mediciones, aunque se aprecia un ligero deterioro en los resultados del método R con el incremento de la varianza del ruido.

Tabla 4.1: Errores promedio de exponencial (exp.) con RB

RB (σ^2)	IME (sigma-gamma)			R			J		
	Tipo I	Tipo II	Total	Tipo I	Tipo II	Total	Tipo I	Tipo II	Total
0,01	169,40	0	169,40	276,60	20,20	296,80	676,00	0	676,00
0,03	150,80	0	150,80	217,27	101,40	318,67	676,00	0	676,00
0,06	151,87	0	151,87	292,33	149,33	441,67	676,00	0	676,00
0,09	133,13	0	133,13	235,33	200,67	436,00	676,00	0	676,00
0,12	132,60	0	132,60	245,73	219,20	464,93	676,00	0	676,00
0,25	122,07	0	122,07	252,87	282,13	535,00	676,00	0	676,00
0,5	110,87	0	110,87	237,8	357,73	595,53	508,53	172,8	681,33

Tabla 4.2: Errores promedio de exponencial (exp.) con RC

RC (σ^2)	IME (sigma-gamma)			R			J		
	Tipo I	Tipo II	Total	Tipo I	Tipo II	Total	Tipo I	Tipo II	Total
0,01	210,13	0	210,13	2591,53	2,53	2594,07	676,00	0	676,00
0,03	188,276	0	188,27	2540,13	27,13	2567,27	676,00	0	676,00
0,06	165,47	0	165,47	2618,93	37,13	2656,07	676,00	0	676,00
0,09	179,33	0	179,33	2377,47	64,60	2442,07	676,00	0	676,00
0,12	175,53	0	175,53	2568,73	59,53	2628,27	676,00	0	676,00
0,25	175,07	0	175,07	2459,40	72,20	2531,60	655,07	21,60	676,67
0,5	239,80	5,73	245,53	2525,27	102,07	2627,33	487,60	194,40	682,00

Por otra parte el método J muestra estabilidad tanto para RB como para RC, aunque se ve afectado por la manera en que desliza la ventana lo que provoca que cuando comete un error, el mismo se propaga a todas las muestras de esa ventana.

En todos los casos los promedios de errores del IME son inferiores o iguales al de los restantes métodos. La diferencia es estadísticamente significativa en las tablas de errores totales y de errores de tipo I. En los errores de tipo II en 23 casos ANOVA no arrojó diferencias significativas entre el IME y alguno de los restantes métodos.

Tabla 4.3: Errores promedio de trapezoidal (trap.) con RB

RB (σ^2)	<u>IME</u> (sigma-gamma)			R			J		
	Tipo I	Tipo II	Total	Tipo I	Tipo II	Total	Tipo I	Tipo II	Total
0,01	112,73	1,00	113,73	528,87	6,73	535,60	245,00	1,00	246,00
0,03	112,20	1,00	113,20	451,93	9,93	461,87	245,00	1,00	246,00
0,06	112,47	1,00	113,47	514,20	11,40	525,60	245,00	1,00	246,00
0,09	110,60	1,00	111,60	442,20	16,27	458,67	245,00	1,00	246,00
0,12	110,87	1,00	111,87	448,80	18,60	467,40	245,00	1,00	246,00
0,25	109,47	1,00	110,47	428,40	22,47	450,87	245,00	1,00	246,00
0,5	115,07	0,87	115,93	384,47	28,27	412,73	236,07	3,40	239,47

Tabla 4.4: Errores promedio de trapezoidal (trap.) con RC

RC (σ^2)	<u>IME</u> (sigma-gamma)			R			J		
	Tipo I	Tipo II	Total	Tipo I	Tipo II	Total	Tipo I	Tipo II	Total
0,01	111,67	1,00	112,67	2911,33	1,27	2912,60	256,33	1,00	257,33
0,03	111,60	1,00	112,60	2831,33	2,93	2834,27	245,00	1,00	246,00
0,06	113,53	1,00	114,53	2885,27	3,93	2889,20	236,07	3,40	239,47
0,09	114,80	1,00	115,80	2652,60	6,93	2659,53	245,00	1,00	246,00
0,12	112,67	0,93	113,60	2862,60	7,67	2870,27	245,00	1,00	246,00
0,25	121,27	0,73	122,00	2750,27	8,73	2759,00	229,53	8,20	237,73
0,5	183,40	0,73	184,13	2805,07	9,47	2814,53	200,33	13,00	213,33

De acuerdo a las pruebas realizadas se ha verificado que el método propuesto es más robusto que los otros dos métodos seleccionados, en especial cuando el ruido que contamina la señal es coloreado (no blanco).

El método R no necesita de la selección de un valor de ventana preliminar. Tiene bajos requerimientos de memoria y es computacionalmente simple, lo que lo hace ideal para aplicaciones empotradas. Sin embargo, para aplicarlo requiere que no exista auto-correlación en los datos de cada variable. Éste determina la condición de EE por muestra y requiere de la configuración de cinco parámetros.

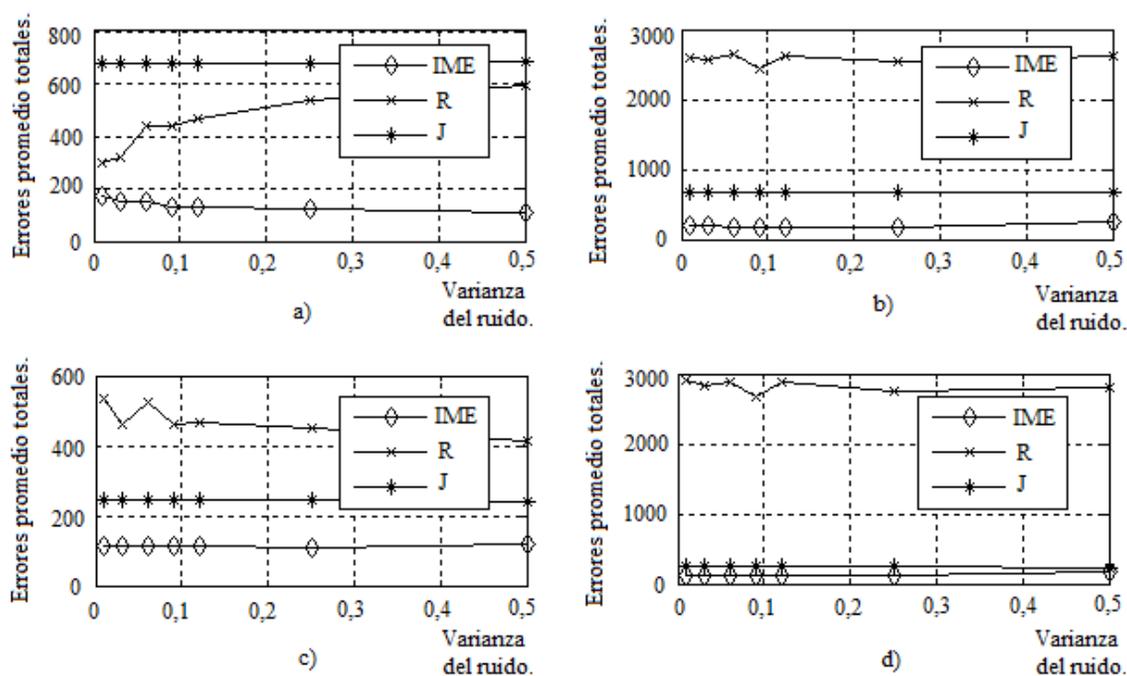


Figura 4.4: Errores promedio totales: a) exp. RB, b) exp. RC, c) trap. RB, d) trap. RC

El método J es del tipo basado en ventanas deslizantes. Requiere de la configuración de tres parámetros y determina la condición de EE por ventana. Sin embargo, este método tiene el inconveniente que no desliza la ventana muestra a muestra sino que la desliza en el ancho de la ventana lo que implica que un error en la clasificación de la ventana se propaga a todas las muestras de la misma.

El método propuesto es robusto ante datos correlacionados. Permite modificar el paso de desplazamiento de la ventana. A paso unitario tiene la mayor resolución en la DEE. En términos de complejidad computacional, el método propuesto es el de mayores requerimientos pues tiene dos recorridos sobre la serie temporal; uno inicial para la

segmentación (componente ‘sigma’) basada en cálculo de desviación estándar (σ), y el otro adicional para la rectificación de coordenadas y la verificación de tolerancia (componente ‘gamma’) de cada segmento candidato basado en medias móviles. Sin embargo, tal y como se refleja en el trabajo (Kelly y Hedengren, 2013) con la aparición de ordenadores de varios núcleos, la carga computacional de los algoritmos basados en el cálculo de la media, la desviación estándar o de pendientes no representa un problema para los supervisores actuales.

4.3 Ejemplo de aplicación de los métodos a registro industrial: procedimiento para análisis comparativo

La aplicación del método propuesto a registros industriales se muestra sobre una trama del registro de la variable potencia N_p , a partir del arranque posterior al mantenimiento parcial de Agosto del 2012. El experto realiza el posicionado visual de cursores que se muestra en la figura 4.5 y determina el conjunto LS_{vis} con la lista de pares de coordenadas de cada segmento de EE, y consecuentemente construir su respectiva señal binaria de referencia (epígrafe 1.6). El trazo de color rojo es el comienzo de segmento y el verde delimita el fin (Vazquez y Llosas, 2010; Vazquez y otros, 2011).

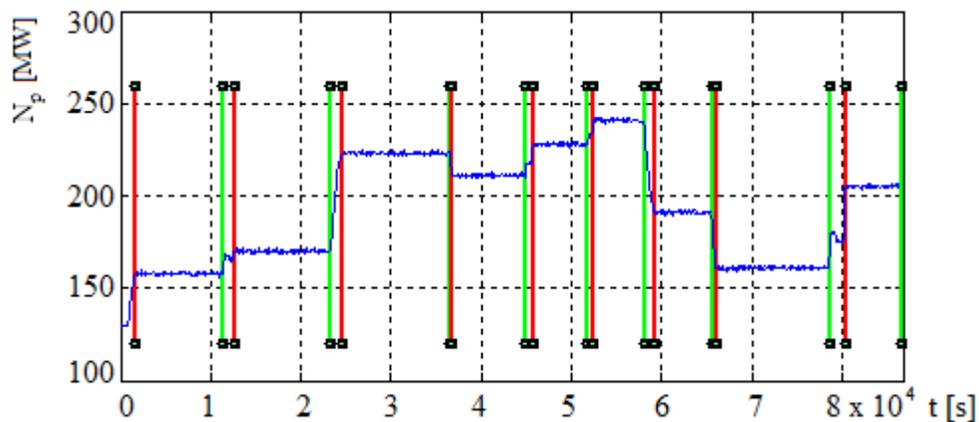


Figura 4.5: Detección manual de segmentos de EE

El total de muestras del registro de N_p es de 86776. De éstas, 76874 pertenecen a medidas detectadas en EE y el resto, 9902 a medidas detectadas de ET.

Para examinar la propiedad de auto-correlación en éste, se aplica el comando de MATLAB® autocorr al registro N_p . El resultado mostrado en la figura 4.6 indica que se está en presencia de registro en el cual las muestras están auto correlacionadas.

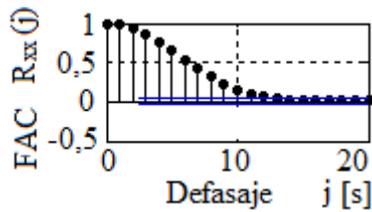


Figura 4.6: Función de auto-correlación del ruido de registro industrial

Para la configuración del ancho de la ventana exploratoria con fines de DEE se considera la constante de tiempo de mayor orden de magnitud (300 s) y la condición de tres veces su valor. Como la operación es bajo control de planta completa, este es mucho mayor que el requerido con lo cual se garantiza DEE libres de intervalos en ET.

Los algoritmos se configuran como sigue:

IME: $L_{min} = 900, L_{max} = 950, L_f = 300 e_R = 0,1$ y $e_V = 1$

J: $L = 900, t_{crit}^m = 2$ y $t_{crit}^M = 3$.

R: $L_1 = 0,05, L_2 = 0,05, L_3 = 0,05, R_{inf} = 0,8$ y $R_{sup} = 1,3$

En la tabla 4.5 se muestran los resultados de cada tipo de error que se logra con cada método. Estos constituyen una muestra en la eficacia del método propuesto.

Tabla 4.5: Errores en la DEE

<u>IME</u> (sigma-gamma)			R			J		
Tipo I	Tipo II	Total	Tipo I	Tipo II	Total	Tipo I	Tipo II	Total
2556	0	2556	76974	10	76984	4496	2598	7094

4.4 Verificación del algoritmo de detección de coincidencia

Para verificar que el algoritmo opera correctamente en la coincidencia por defecto ($t_{min} = 0$) y ante discriminación por tiempo ($t_{min} > 0$) se diseñan dos secuencias sintéticas (los EE con trazos negros y los ET con trazos verdes). Se consideró un total de ocho VP.

En la figura 4.7a se muestran secuencias de cuatro segmentos en EE por VP con distribución irregular entre ellos. En la Figura 4.7b se muestran las secuencias de tres segmentos de EE por VP con distribución regular entre ellos.

La efectividad de la solución de cómputo se verifica al obtener correctamente los valores conocidos de lista de pares de coordenadas, LS_c de EE coincidentes entre las VP. Con trazo rojo se visualizan ejemplos de los resultados de coincidencia para $t_{min} > 100$.

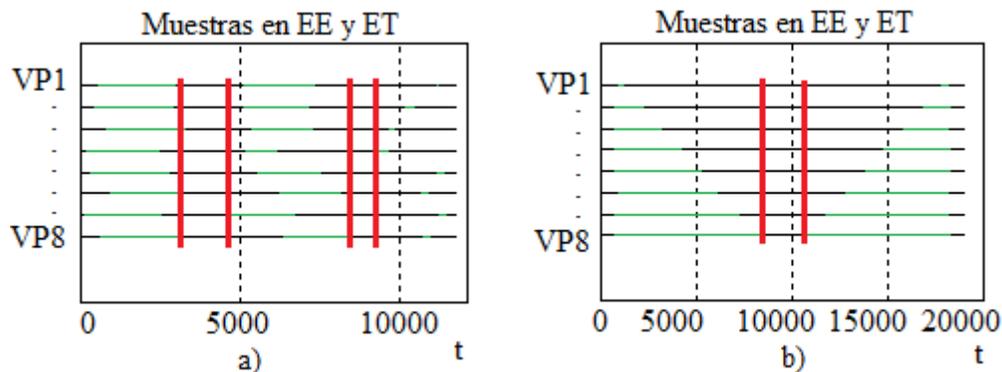


Figura 4.7: Secuencias de segmentos en EE y ET: a) irregular y b) regular

4.5 Presentación del contexto de experimentación

El laboratorio para la experimentación ha sido la unidad dos de la Central Termoeléctrica (CTE) "Lidio Ramón Pérez" de Felton, (Cuba). Cuenta con dos UGE de 250 MW cada una. Fue construida por la empresa checa SESTLMACE (Slovenske Energeticke Strojarne) y puesta en operación en Noviembre del 2001. Es la de mayor potencia instalada del país.

La experimentación con plantas de este tipo se enfrenta a problemáticas de seguridad industrial y por producciones que están comprometidas con el mercado. Existen restricciones con el acceso a los registros supervisados (en Cuba se encarga la Oficina de Seguridad de Redes Informáticas, OSRI). Otra complejidad es la falta de reproducibilidad de los experimentos y la aleatoriedad con que se presentan los efectos de las mismas degradaciones, tanto en plazos como en magnitud. Como alternativa, en una primera etapa se experimentó con un subproceso simulado de un bloque de 200 MW de la Central Termoeléctrica de Detmarovice (República Checa) construido por la misma empresa checa SESTLMACE. Sus generadores de vapor son de hornos presurizados y tienen una estructura similar a la cubana (Ozana y otros, 2011).

4.6 Sobrecalentador simulado de la Central Termoeléctrica de Detmarovice

Este caso de estudio es un sobrecalentador de techo para el cual se tiene desarrollado un modelo simulink. El experimento consiste en la corrida de dicho modelo ante una modificación secuencial del coeficiente de transferencia de calor entre la pared y la corriente de gases, α_{s2} . La primera columna de la tabla 4.6 indica los valores. Con la alteración de dicho coeficiente se observó y verificó, el efecto del ensuciamiento de superficie sobre los valores de EE del flujo de agua de atemperamiento, M_{wr} . La temperatura del vapor a su salida es insensible al ensuciamiento mediante ante la acción del sistema de control formado por dos controladores Proporcional Integral Derivativo, (PID). La segunda columna de la tabla 4.6 presenta los valores de EE de la VM ($\overline{M_{wr}}$) después de aplicarle la DEE con el IME.

Tabla 4.6: Efecto de los cambios en α_{s2} sobre M_{wr}

α_{s2} [$J \cdot m^{-2} s^{-1} K^{-1}$]	\overline{M}_{wr} [kg/s]
71,8*	2,60565
71,3	2,53669
70,7	2,51059
Emulando α_{s2} posterior a un proceso de soplado de su superficie exterior.	
71,15	2,52051

(*) Sin ensuciamiento

El resultado numérico de la cuarta fila indica una situación de mejora, o sea, de menos ensuciamiento y por ende mayor cantidad de flujo de agua de atemperamiento para reducir la temperatura del flujo de vapor. Éste es el efecto de una operación de soplado de hollín, el cual se ha simulado modificando el parámetro α_{s2} hacia una nueva condición que representa un mejor desempeño en la transferencia de calor entre la pared y la corriente de gases.

La secuencia de variación de este parámetro α_{s2} ejemplifica como la superficie exterior de intercambio de calor se va degradando a lo largo del tiempo antes que se decida la acción correctora de soplado. La variable seleccionada de este experimento es M_{wr} .

4.7 Generador de vapor de la Central Termoeléctrica de Felton

En el anexo F se brindan los datos de interés del proceso: En la figura F.1 la ubicación relativa de los subprocesos del GV, en la figura F.2 la estructura del sistema de adquisición, procesamiento y supervisión de la unidad dos, en la tabla F.1 las variables de los experimentos, en la tabla F.2 las características de sensores por variables y en la tabla F.3 las características de sistema de adquisición y procesamiento.

Con base a los criterios (ii) y (iii) del epígrafe 3.9 se realiza la selección de variables y su discusión se realiza en el epígrafe 4.7.1.

Con base al criterio de monitorizar los efectos de la degradación de un proceso específico, se toma como caso de estudio al ensuciamiento de las superficies exteriores de intercambio de calor en el GV y en el CAR y se realiza en el epígrafe 4.7.2.

4.7.1 Aplicación del procedimiento en un generador de vapor: Monitorización del desempeño global

Los registros de muestras (pueden ser consultados en los anexos G y H) son:

- (i) Después de un arranque y con cuatro días de registro (Blanco y otros, 2012a).
- (ii) Durante un registro de corta duración de 11 horas (Blanco y otros, 2013).

En el cálculo de índices de sobre consumo la selección de variables que intervienen son las siguientes: Temperatura del vapor sobrecalentado, $T_{SSH4(l)}$, $T_{SSH4(r)}$, Temperatura del vapor recalentado, $T_{SRH2(l)}$, $T_{SRH2(r)}$, Presión a la salida del último paso de sobrecalentamiento, P_s , Temperatura de salida de los gases, $T_{g(l)}$, $T_{g(r)}$, Temperatura del agua de alimentación al domo, $T_{w(ecc)}$ y para la relación de estequiometría y de evaporación las variables que intervienen son las siguientes: N_p , \dot{V}_f , \dot{V}_a , $\dot{m}_{w(b)}$, y $\dot{m}_{s(l)}$.

En los registros de muestras de los anexos indicados sobre cada uno de ellos, se muestran los resultados de la DEE: el trazo espeso representa a los EE detectados en coincidencia ($t_{min} = 1800$). Con los valores medios calculados de cada VP seleccionada y las condiciones de referencia (trazos de color rojo), los resultados para (i) se grafican en las figuras 4.8 y 4.9, y para (ii) en la tabla 4.7.

Los resultados mostrados en la figura 4.8 (a–d) analizan las lecturas de valores medios de temperatura y presión para los 38 EE. Los dos primeros estados corresponden a un

período de arranque de la unidad y el resto cumplen con las regulaciones de acuerdo a los valores de referencias (trazos de color rojo). En cambio, en la gráfica 4.8c se muestra una diferencia mayor en la temperatura de salida de los gases cuando se compara con su valor de referencia.

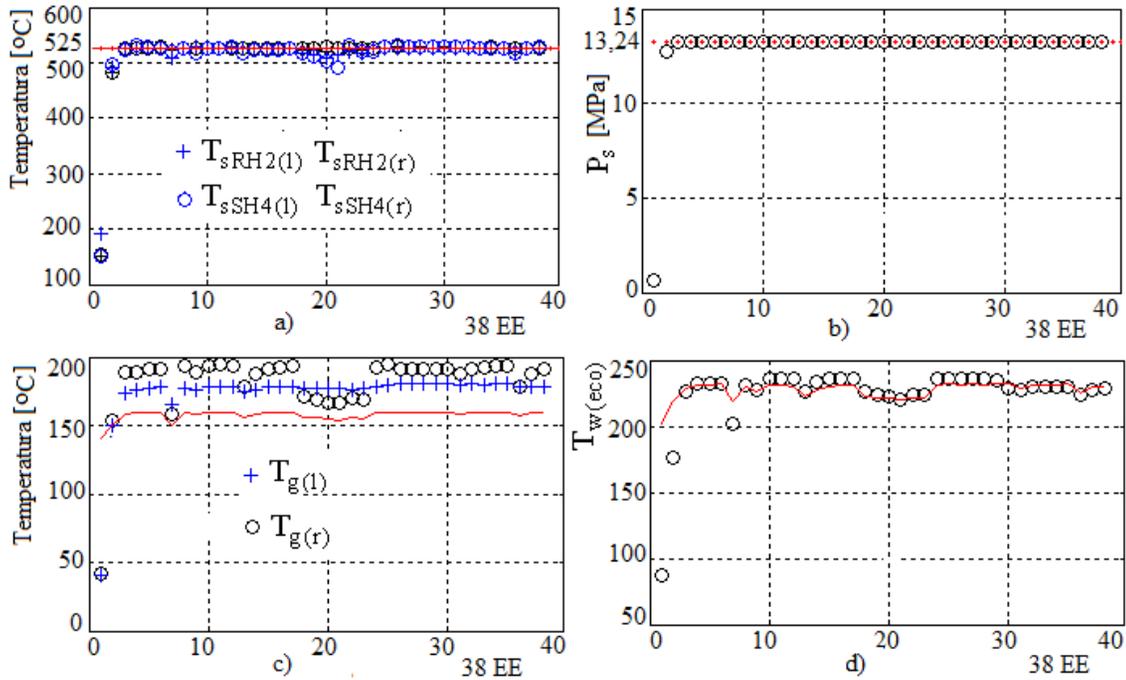


Figura 4.8: Valores de EE y sus valores de referencias normativas.

La figura 4.9a muestra que el GV operó con un exceso de aire de acuerdo a las regulaciones y la figura 4.9b revela un descenso en el flujo total de vapor.

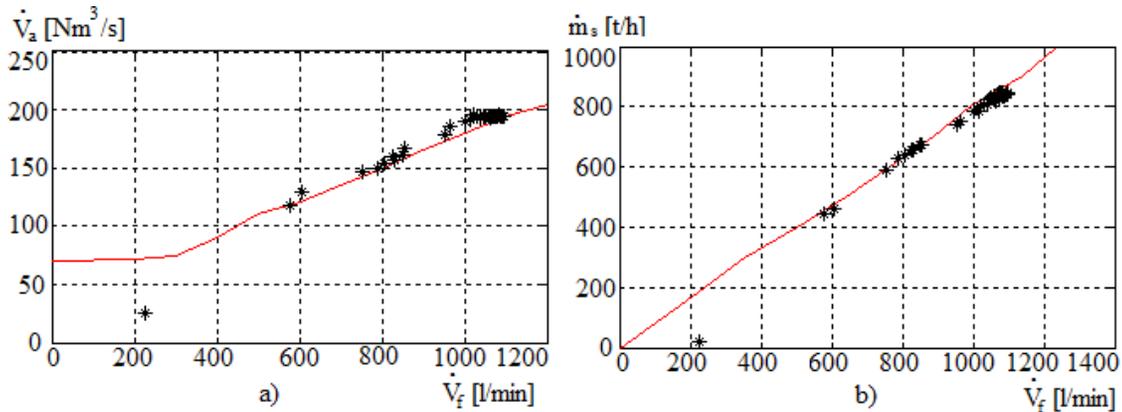


Figura 4.9: Relaciones normativas: a) de evaporación y b) de estequiometría

La tabla 4.7 muestra los resultados de un EE de los seis detectados. La medición de la temperatura de los gases a la salida denota que existen problemas con el flujo de transferencia de calor de los gases a la sustancia de trabajo.

Tabla 4.7: Resultados por VP de la DEE en un EE

	VARIABLES	REFERENCIA	VALOR MEDIO CALCULADO
1	$T_{SSH4} (^{\circ}\text{C})$	525	529,89
2	$T_{SRH2} (^{\circ}\text{C})$	525	527
3	$P_s (\text{MPa})$	13,2400	13,2324
4	$T_{w(eco)} (^{\circ}\text{C})$	231,71	236,76
5	$T_g (^{\circ}\text{C})$	158,75	186,75

Las magnitudes de las desviaciones detectadas en las variables de temperaturas, particularmente de varios grados en los gases de salida, confirma que estas VP no son VC, no siendo así, el caso de la presión del vapor principal, P_s , que si es una VC, como indica la tabla 2.1. Para el caso de la temperatura de entrega de vapor a turbina, ya sea para la etapa del cilindro de alta presión o para la etapa del cilindro de media presión, sus valores dependen de la regulación de temperaturas de puntos de medición precedentes empleando circuitos de atemperamiento, y para el caso de temperatura de gases no existe regulación directa.

En cuanto a la asociación de las desviaciones detectadas a sus posibles causas, las investigaciones posteriores al mantenimiento, determinaron que la razón fue el ensuciamiento de superficies en el trayecto de los gases del horno a la chimenea, con mayor afectación en las superficies del CAR (Palmero, 2011; Blanco y otros, 2012a).

4.7.2 Aplicación del procedimiento en un generador de vapor: Monitorización del ensuciamiento en el CAR

Se seleccionó el ensuciamiento del CAR porque es uno de los factores de mayor incidencia sobre la eficiencia y la disponibilidad de la UGE al SE. La selección de variables que intervienen pueden ser agrupadas atendiendo a la naturaleza de los fenómenos presentes en la transferencia de calor. Estas son las siguientes:

En el movimiento de los gases: Apertura de las compuertas del VTF y VRG; $X_{VTF(l)}$; $X_{VTF(r)}$, $X_{VRG(l)}$, $X_{VRG(r)}$, Presión del aire a la salida del VTF; $P_{e(l)}$, $P_{e(r)}$, Presión de gases en el horno; $P_{h(1)}$, $P_{h(2)}$, $P_{h(3)}$, Presión de gases a la entrada del CAR; $P_{ec(l)}$, $P_{ec(r)}$, Presión de gases a la salida del CAR; $P_{sc(l)}$, $P_{sc(r)}$.

En las corrientes de gases transportando calor para ser transferido: Temperatura de los gases a la entrada del CAR, $T_{gec(l)}$, $T_{gec(r)}$, y la Temperatura de los gases a la salida, $T_{g(l)}$, $T_{g(r)}$.

En las corrientes de aire: Temperatura del aire a la entrada del CAR; $T_{aec(l)}$, $T_{aec(r)}$, Temperatura del aire a la salida del CAR; $T_{asc(l)}$, $T_{asc(r)}$.

En la toma de registros de muestras de esta aplicación del procedimiento, está intercalado un mantenimiento de tipo parcial de Agosto del 2012. En este se limpiaron todas las superficies interiores y exteriores de intercambio de calor y se ajustaron los quemadores y el proceso de combustión completa. Para construir las curvas de buen desempeño relativo se cuenta con 13 nodos que cubren el rango de operación (ver anexo I). De estos, cuatro puntos de operación corresponden a la prueba de comportamiento del cinco de Septiembre del 2012 (Martino y García, 2012) y los restantes nueve puntos de operación proceden de aplicar la DEE a registros en los días cercanos al arranque de la UGE

(régimen mostrado en la figura 4.6). Con estos nodos se construye la función vectorial \vec{H}_y (véase epígrafe 3.10.2)

Con el propósito de observar en una VLP al efecto corrector del mantenimiento y los efectos de la sistemática degradación acumulativa después del arranque, se organiza la toma de los registros de muestras en plazos de varios días. En la configuración de estos plazos de tiempo, para la primera muestra se tuvieron en cuenta los resultados de las investigaciones de laboratorios en (Yang y otros, 2009) que indican que lo típico es que los efectos de las acciones degradantes por ensuciamiento se induzcan en plazo hasta de un mes. Las dos restantes se espaciaron en no menos de diez días y se localizaron períodos de operación que no coincidieran al momento que se ejecutaba el soplado. La toma de muestras de registros (véase figura 4.10), en fecha, y los valores medios de las potencias de operación, es como sigue:

- (i) Antes de la parada para el mantenimiento parcial: 23 de Julio del 2012 (G_1)
y posterior al arranque en las fechas siguientes:
- (ii) 28 de Septiembre del 2012 (G_2),
- (iii) 14 de Octubre del 2012 (G_3) y
- (iv) 24 de Octubre del 2012 (G_4).

La agrupación de las desviaciones en VCP de tres días, permite que en la VLP se obtengan los resultados que se grafican en las figuras 4.11 - 4.16. La figura 4.17 ofrece una evaluación de efecto en el desempeño global. El código de colores que se emplea en todas las figuras es: ---+--- Referencia $\text{---}\square\text{---}$ G_1 $\text{---}\circ\text{---}$ G_2 $\text{---}\ast\text{---}$ G_3 $\text{---}\diamond\text{---}$ G_4 . En todas ellas se muestra la evolución de las desviaciones por variable en todo el rango de operación en potencia.

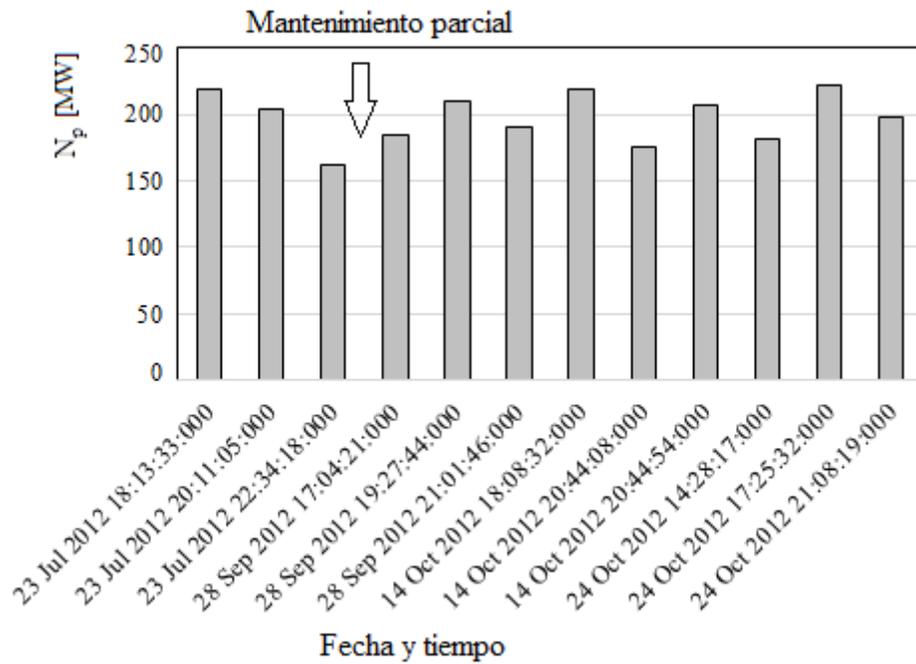


Figura 4.10: Ejemplo de experimentación a largo plazo

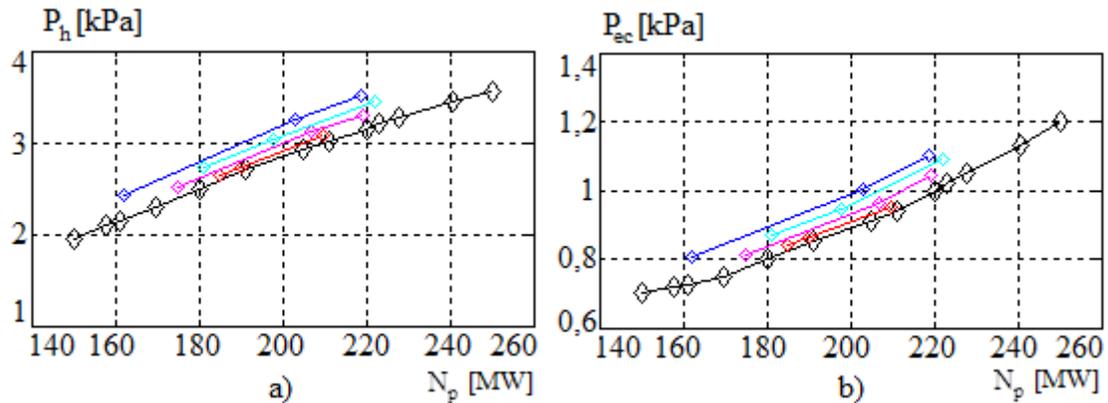


Figura 4.11: Presión del lado de gases: a) del horno y b) a la entrada del CAR

El análisis de las desviaciones indicadas en las figuras 4.11 - 4.16, es el siguiente:

Unos días antes de la parada de la unidad dos para el trabajo de mantenimiento parcial existía una elevada degradación por ensuciamiento en las superficies de intercambio en el eje convectivo y en el CAR. Así lo demuestran las desviaciones existentes en los diferentes puntos de mediciones de presión en las corrientes de aire a la salida del VTF y en las corrientes de gases del horno y a la entrada del CAR.

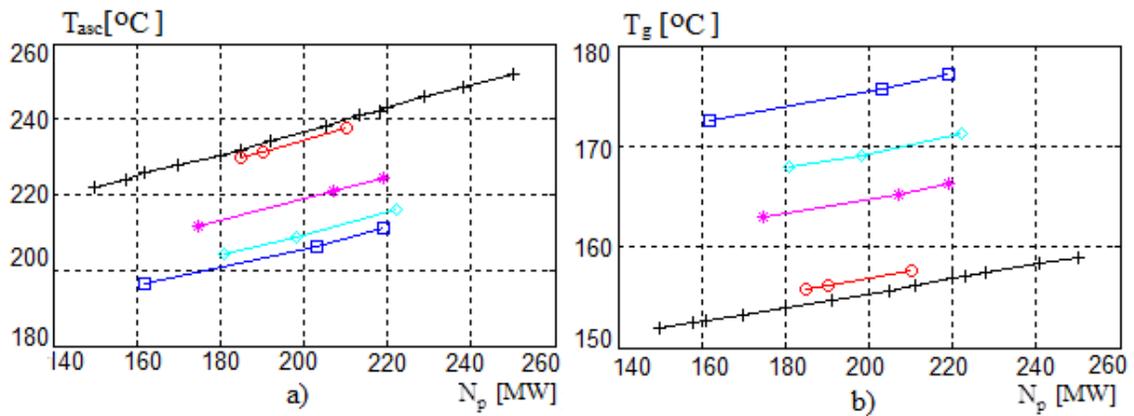


Figura 4.12: Temperaturas en el CAR: a) aire de entrada y b) en gases de salida

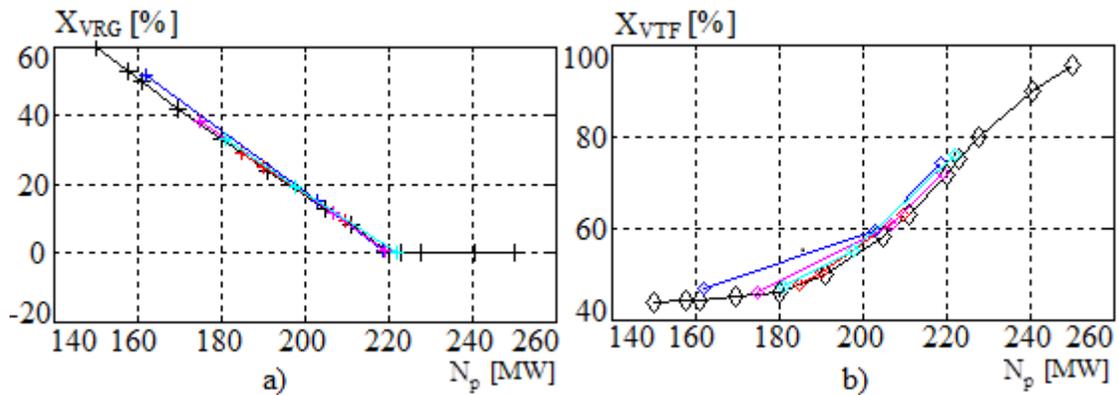


Figura 4.13: Apertura de compuertas: a) del VRG y b) del VTF

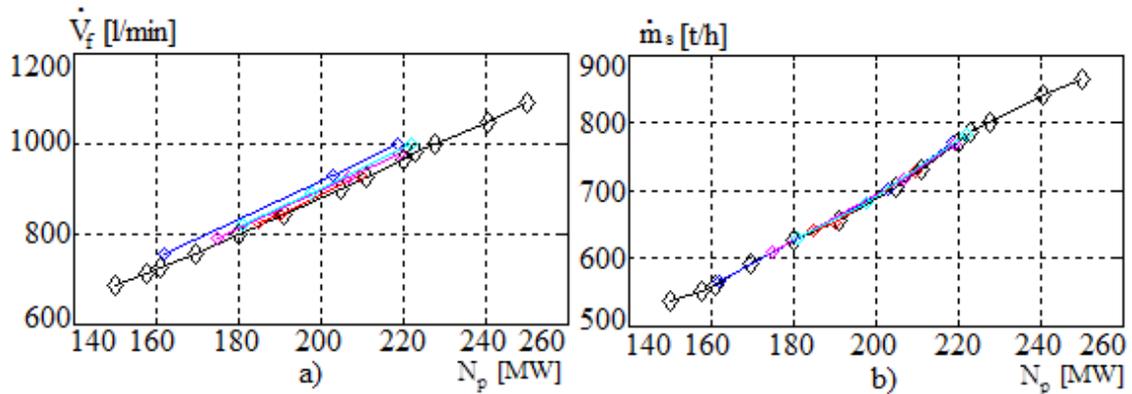


Figura 4.14: Combustión: a) flujo de combustible, b) flujo de vapor

Este tipo de degradación por ensuciamiento se manifiesta, además, en las mediciones de temperatura. Se observa que los perfiles de temperatura sobre gases aumentan tanto a la entrada del CAR (debido a ensuciamiento de las superficies del eje convectivo) como a la salida del propio CAR. En particular, existe una incidencia en el incremento de la

temperatura de los gases a la salida y una disminución de la temperatura del aire precalentado a su salida.

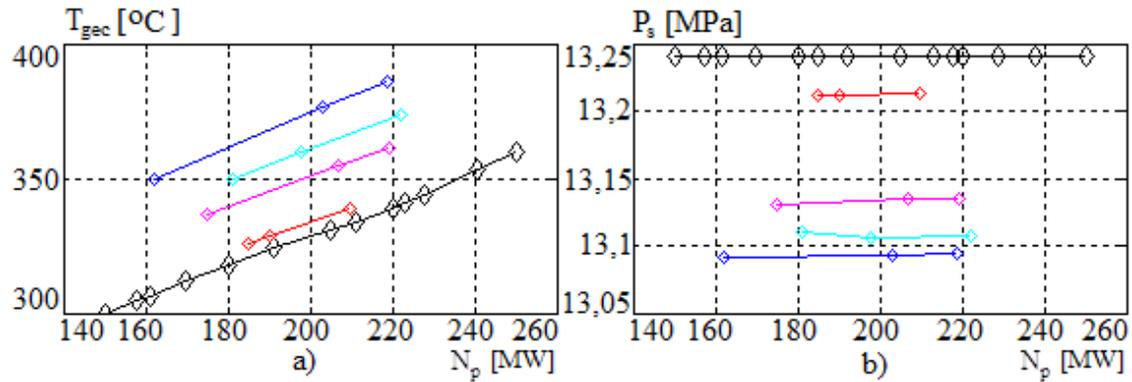


Figura 4.15: a) Temperatura de gases, b) presión de vapor

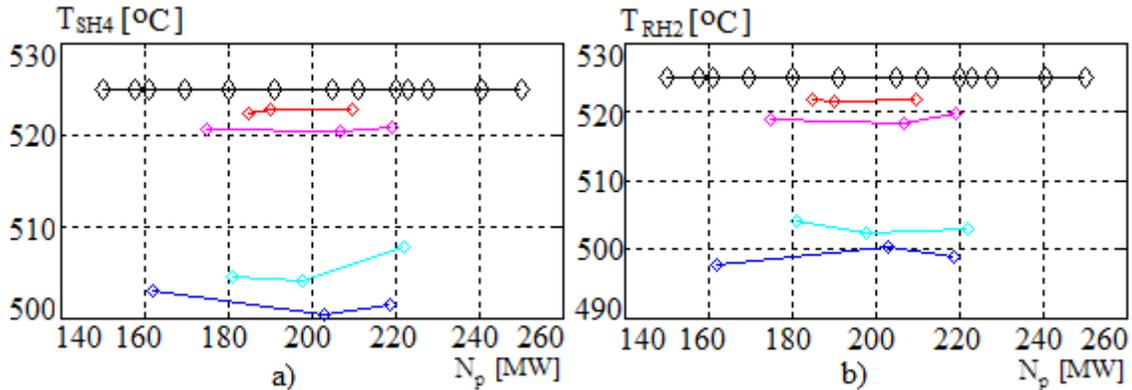


Figura 4.16: Temperatura de vapor: a) sobrecalentado, b) recalentado

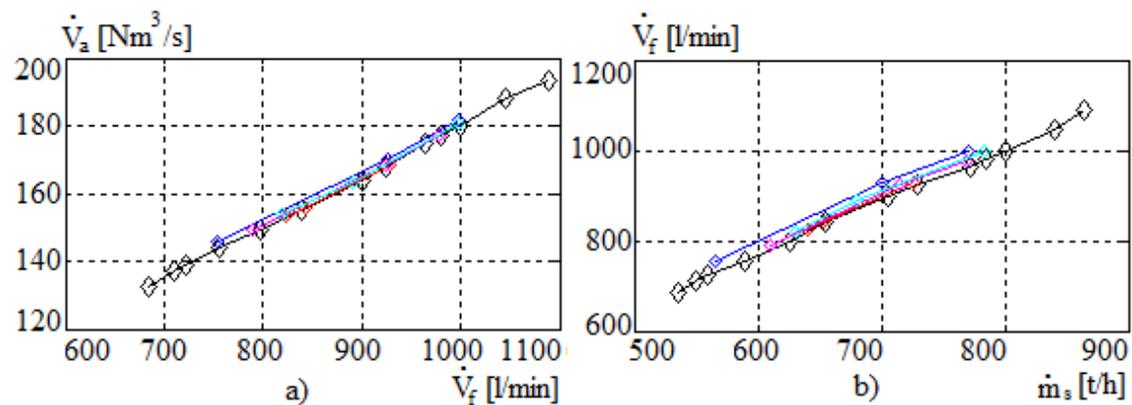


Figura 4.17: Relaciones normativas: a) estequiometría y b) evaporación

Estas afectaciones también perturban el cumplimiento de los valores normados para las variables del ciclo térmico, pues se tiene disminución de las temperaturas a la salida del

sobrecalentador y del recalentador, así como se tiene una caída en la presión a la entrada del cilindro de alta presión. Se observa un efecto global de decremento en la relación de evaporación en la medida que se incrementa el ensuciamiento acumulativo.

Desde el punto de la automatización de la planta, las gráficas revelan el incremento del flujo de combustible; es decir sobreconsumo, lo cual se explica como una respuesta del sistema de control para poder suministrar la energía adicional que está siendo perdida en forma de calor que se va en los gases a la atmósfera. Se observa, además, el incremento del porcentaje de apertura de las compuertas de aire en la medida que los niveles de ensuciamiento aumenta reflejado en la magnitud que alcanza la presión del horno. Asimismo, el porcentaje de apertura de las compuertas de recirculación de gases se modifica como respuesta del sistema a contrarrestar la disminución del desempeño en cuanto al decrecimiento de la temperatura del vapor recalentado. Se revela, además, que existe un incremento de flujo de aire respecto a la relación de estequiometría.

De las magnitudes de las desviaciones calculadas sobre las primeras muestras tomadas posterior al arranque por mantenimiento se reveló que la situación de ensuciamiento quedó revertida. Sin embargo, con el transcurso de los días las magnitudes de las desviaciones continúan incrementándose. Este resultado ratifica que las acciones degradantes son ininterrumpidas y acumulativas.

Conclusiones del capítulo

Presentada la evaluación del método de DEE y la comprobación del procedimiento en las pruebas experimentales se enuncian las siguientes conclusiones:

- (i) La aplicación de la técnica ANOVA, demostró estadísticamente un desempeño significativamente mejor para el nuevo método que los otros dos recientemente reportados por la literatura científica dedicada al control de procesos. Éste posee,

además, la prestación de verificar la tolerancia de la media del segmento de EE con su tendencia.

(ii) En la comprobación sobre muestras reales el método propuesto mostró mejores resultados que los dos más recientes publicados en la literatura científica.

(iii) La propuesta de emplear secuencias de listas de coordenadas resultantes conocidas permitió verificar la correcta operación del algoritmo de coincidencia.

(iii) Se comprobó que con el empleo del procedimiento para la monitorización del GV en la UGE de experimentación, es posible aprovechar los registros históricos para detectar, a diferentes plazos de tiempo, las desviaciones que sobre las diferentes VP seleccionadas se ocasionan por las acciones perturbadoras de lento desarrollo, provocándole el empeoramiento al desempeño en su operación respecto al deseado.

(iv) Se mostró la factibilidad de la estructura de cómputo propuesta en la implementación práctica del procedimiento.

(v) Se reveló que la estructura de curva de buen desempeño relativo por variable es adecuada para la detección de los efectos de perturbaciones de lento desarrollo en el desempeño de la operación a carga base, particularmente se mostró en la detección de los efectos acumulativos del ensuciamiento de superficies exteriores en intercambiadores en el GV.

CONCLUSIONES

Como resultado final arrojado por esta investigación, se tiene que se propuso un método nuevo, que lleva a cabo la DEE correctamente al ser verificado experimentalmente, y que le aporta los datos de entrada a un procedimiento nuevo dedicado a la monitorización del desempeño de la operación bajo los efectos de perturbaciones de lento desarrollo, el cual quedó comprobado al aplicarlo al GV de la unidad dos de Felton. A partir de estos resultados, se plantean las conclusiones generales siguientes:

- (i) De la valoración efectuada del marco teórico relativo a las técnicas para la DEE, se estableció que la solución debe desarrollarse por VP, con procesamiento por ventanas, detectándole a cada registro, en base al cálculo de la varianza, sus intervalos candidatos en EE, y con base a la tendencia sobre cada uno de ellos, discriminándole de sus transiciones entre tipos de estados, a los subconjuntos de muestras en ET. Antes de dar al intervalo rectificado como válido, se verifica que cada aproximación de los valores de cada intervalo detectado a valor medio satisfaga una tolerancia prescrita con base a la tendencia, todo lo cual prevé una solución practicable para tiempo real.
- (ii) Quedó demostrado estadísticamente que el método propuesto tiene un desempeño significativamente mejor que dos recientes de la literatura científica del tema, con el cual se superan las limitaciones existentes en la DEE sobre señales industriales contaminadas con ruido de diferentes niveles potencias y grado de auto-correlación.
- (iii) Quedó verificado que el algoritmo adicional para la determinación de coincidencias opera correctamente y además que la vía empleada mediante el diseño de secuencias con resultados conocidos es factible.

(iv) Se evidenció que con el procedimiento propuesto para la monitorización del desempeño de la operación, se reduce la falta de precedencia en la literatura científica al investigar la DEE (concentrada a la industria de procesos químicos, principalmente la refinación de petróleo) sobre registros del GV como técnica que los transforma con la finalidad de la detección de los efectos de las perturbaciones de lento desarrollo a su sistema de control de planta completa.

(v) Se reveló que la técnica de interpolar datos preservando la monotonía es una solución factible del procedimiento para enfrentar la necesidad de caracterizar el buen desempeño relativo de la operación en carga base ante el rigor real de contar con pocos puntos para todo el rango que despliega en potencia la UGE para el SE.

(vi) Ante la complejidad que entraña la interdisciplinariedad del procedimiento en la selección de VP, se ofreció una guía resumen de los diferentes subprocesos en torno al GV con las variables que se instrumentan y que son potencialmente portadoras de los efectos de las acciones degradantes que afectan el desempeño en su operación.

(vii) El trabajo realizado sentó las bases para llevar a cabo el estudio de otros métodos para la DEE que facilita el desarrollo de futuros trabajos de investigación.

Los resultados positivos alcanzados con el método y con las comprobaciones al aplicar el procedimiento sobre el GV en la UGE conectada a SE, demuestran que los objetivos trazados para la investigación fueron cumplidos y se evidenció la veracidad de la hipótesis planteada sobre los beneficios del diseño y explotación de sistemas para la monitorización del desempeño de la operación sometida ininterrumpidamente a perturbaciones de lento desarrollo.

RECOMENDACIONES

Como principales recomendaciones del presente trabajo se proponen:

- (i) Modelar otras formas de ondas bases contaminadas con RB y RC de diferentes PSNR para la evaluación del desempeño de cada método bajo otras trayectorias de transiciones y fluctuaciones en torno a los intervalos de EE.
- (ii) Efectuar estudios sobre las técnicas de pre-procesamiento de las series temporales industriales para el robustecimiento de la calidad en la entrada de datos a la DEE eliminando los posibles valores atípicos (outliers) y reconstruyendo aquellos posibles valores ausentes o perdidos en el registro.
- iii) Efectuar estudios sobre la validación de las magnitudes de los datos que resultan de la DEE reconciliando las magnitudes de EE calculadas de unas variables respecto a otras.
- (iv) Experimentar, examinar y evaluar en línea al método propuesto.
- (v) Enfocar la aplicación del procedimiento para la monitorización a trabajos futuros de investigación orientados a introducir un sistema automatizado asistente de la operación y finalmente hacia un sistema de alerta temprana. Para esto, extender la detección de estados estacionarios al resto de los subprocesos de la unidad dos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, M., Majid , A. A. & Ali, J., 2011. *Monotonicity Preserving Interpolation using Rational Spline*. Hong Kong, En: Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, IMECS 2011, ISBN: 978 - 988 - 18210 - 3 - 4, Hong Kong, China, pp. 278 - 282.
- Abbas, M., Majid, A. & Ali, J., 2012. Monotonicity Preserving C2 Rational Cubic Spline for Monotone Data. *Applied Mathematics and Computation*, 219(6), pp. 2885-2895.
- Alpay, B., Holloway, J. & Lee, J., 2007. *Degradation Monitoring in Iris Steam Generators*. Monterrey, California, En: Joint International Topical Meeting on Mathematics & Computation and Supercomputing in Nuclear Applications (M&C + SNA 2007), pp. 88-96.
- ASME, 1998. *An American National Standard: Fired Steam Generator, Performance Test Code (PTC -4)*. New York, U.S: American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- ASME, 2010. *An American National Standard: Performance Monitoring Guidelines for Power Plants, Performance Test Code, (PTC-PM)*. New York, U.S: American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- Aström, K. J. & Wittenmark, B., 1997. *Computer Controlled Systems: Theory and Design*. 3rd Edition. ed. New York, U.S: Prentice Hall, ISBN: 7-303-05008.
- Bacci di Capaci, R. & Scali, C., 2014. Stiction Quantification: A Robust Methodology for Valve Monitoring and Maintenance Scheduling. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53, pp. 7507-7516.
- Bagajewicz, M., 2001. *Process Plant Instrumentation: Design and Upgrade*. Pennsylvania, U.S: Technomic Publishing Company, Inc. ISBN: 1-56676-998-1.
- Ballester, J. & García, A., 2010. Diagnostic Techniques for the Monitoring and Control of Practical Flames. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(4), pp. 375-411.
- Basseville, M., 1988. Detecting Changes in Signals and Systems: A Survey. *Automation*, 2(3), pp. 309-326.

- Birmingham, S. y otros, 1999. Monitoring Heat Exchanger Fouling for Optimal Operation of a Multiple Effect Evaporator. *Computers and Chemical Engineering Supplement*, pp. 771-774.
- Bethea, R. & Rhinehart, R., 1991. *Applied Engineering Statistics*. New York, U.S: Marcel Dekker. ISBN: 1-44676-988-1.
- Bhat, S. & Saraf, D., 2004. Steady State Identification, Gross Error Detection, and Data Reconciliation for Industrial Process Units. *Ind. Eng. Chem. Res*, 43, pp. 4323-4336.
- Blanco, J. M., Vazquez, L. & Peña, F., 2012a. 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, pp. 170-180.
- Blanco, J. & Peña, F., 2008. Analytical Study of the Effects of the Clogging of a Mechanical Precipitator Init in Air Preheaters in a High Performance Thermoelectric Power Plant based on Available Data. *ASME J. Eng. for Gas Turbines and Power*, 130(2), pp. 22001-22007.
- Blanco, J., Vazquez, L., Peña, F. & Diaz, D., 2012b. *Diagnosing Steam Production Systems on Their Multivariable Steady States*. Toulouse, En: 8th Power Plant & Power System Control Symposium, IFAC-PPS 2012, Elsevier: IFAC-PapersOnLine, vol. 8, part 1, ISBN: 978-3-902823-24-3, Toulouse, Francia, pp. 254-259.
- Blanco, J., Vazquez, L., Peña, F. & Diaz, D., 2013. New Investigation on Diagnosing Steam Production Systems from Multivariate Time Series Applied to Thermal Power Plants. *Applied Energy*, 101, pp. 589 - 599.
- Borovkov, A., 1986. *Estadística Matemática: Estimación de los Parámetros*. Moscu: MIR.
- Branislav, S. & Radisa, J., 2011. Software System “DIORES” for the Operation Diagnosis of a Steam Power Plant Unit. *Energy*, 36, pp. 1187-95.
- Brown, P. & Rhinehart, R., 2000. Development and Demonstration of a Method for Automated Steady-State Identification in Multivariable Systems. *Hydrocarbon Processing*, 79(9), pp. 79-83.
- Can, S. & Mazumder, I., 2013. An Expanded Cost of Electricity Model for Highly Flexible Power Plants. *ASME J. Eng. for Gas Turbines and Power*, 130 (2), pp. 11801-11812.
- Cao, S. & Rhinehart, R., 1995. An Efficient Method for On-Line Identification of Steady State. *Journal of Process Control*, 5(6), pp. 363-374.

- Cao, S. & Rhinehart, R., 1997. Critical Values for a Steady State Identifier. *Journal of Process Control*, 7(2), pp. 149-152.
- Caro, E., Arévalo, I., García-Martos, C. & Conejo, A., 2013. Power System Observability Via Optimization. *Electric Power Systems Research*, 104, pp. 207-215.
- Cecilio, I. M., Ottewill, J. R., Pretlove, J. & Thornhill, N. F., 2014. Nearest neighbors method for detecting transient disturbances in process and electromechanical systems. *Process Control*, 24, pp. 1382-1393.
- Cedeño, A. & Trujillo, R., 2013. Estudio Comparativo de Técnicas de Reducción de Ruido en Señales Industriales mediante Transformada Wavelet Discreta y Selección Adaptativa del Umbral. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 10, pp. 143-148.
- Chaparro, L., 2011. *Signals and Systems using Matlab* ®. Oxford, U.K: Academic Press, Elsevier Inc. ISBN: 978-0-12-374716-7.
- Chapra, S., 2012. *Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists*. New York, U.S: 3rd Edition, McGraw-Hill Companies, Inc. ISBN: 978-0-07-340110-2.
- Charbonnier, S., Garcia-Beltan, C., Cadet, C. & Gentil, S., 2005. Trends Extraction and Analysis for Complex System Monitoring and Decision Support. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 18, pp. 21-36.
- Chatfield, C., 2013. Fitting Time Series Models in the Time Domain. En: *The Analysis of Time Series: An Introduction*. New York, U.S: Chapman & Hall/CRC. ISBN: 1-58488-063-5, pp. 55-72.
- Cheung, J. T. & Stephanopoulos, G., 1990. Representation of Process Trends, Parts I and II. *Computers & Chemical Engineering*, 14, pp. 495-540.
- Couch II, L., 2002. *Digital and Analog Communication Systems*. New Jersey, U.S: Sixth Edition, Prentice Hall. ISBN: 0-13-081223-4.
- Coursey, W., 2003. *Statistics and Probability for Engineering Applications with Microsoft* ® Excel. New York, U.S: Newnes, Elsevier Science. ISBN 0-13-081223-4.
- Cronvall, O., 2011. *Structural Lifetime, Reliability and Risk Analysis Approaches for Power Plant Components and Systems*. Helsinki, Finland: VTT Publications. ISBN: 978-951-38-7761-3.
- Crow, E., Davis, F. & Maxfield, M., 1955. *Statistics Manual*. New York, U.S: Dover Publications. ISBN 978-951-38-7760-6.

- Donoho, D. & Johnstone, I. M., 1994. Ideal Spatial Adaptation by Wavelet Shrinkage. *Biometrika*, 81, pp. 425-455.
- Downs, J. & Skogestad, S., 2011. An industrial and Academic Perspective on Plantwide Control. *Annual Reviews in Control*, 35, pp. 99-110.
- Fahrmeir, L., Kneib, T., Lang, S. & Marx, b., 2013. *Regression: Models, Methods and Applications*. Berlin, Germany: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-34332-2.
- Finn , J., Wagner , J. & Bassily, H., 2010. Monitoring Strategies for a Combined Cycle Electric Power Generator. *Applied Energy*, 87(8), pp. 2621-2127.
- Flehmgig, F. & Marquardt, W., 2006. Detection of Multivariable Trends in Measured Process Quantities. *Process Control*, 16, pp. 947 - 957.
- Flehmgig, F., Watzdorf, R. & Marquardt, W., 1998. Identification of Trends in Process Measurements using the Wavelet Transform. *Computer Chem Eng*, 22 (Suppl), pp. 491- 496.
- Gamero, F., Meléndez, J. & Colomer, J., 2011. QSSI: A New Similarity Index for Qualitative Time Series. Application to Classify Voltage SAGS. *Applied Artificial Intelligence*, 25, pp. 141-162.
- Gay, R., Palmer, A. & Erbes , M. R., 2006. *Power Plant Performance Monitoring*. New Delhi, India: Tech Book International. ISBN: 0-9755876-0-9.
- Goodwin, G., Graebe, S. & Salgado, M., 2001. *Control System Design*. New Jersey, U.S: Prentice Hall. ISBN:978-0-13-958633-9.
- Gude, J., Vazquez, L. & Diaz, D., 2011. *A Tailor Made Development for Time Series Data Pre-Processing in Power Industry*. Bilbao, Spain, IEEE- International Symposium on Signal Processing and Information Techology, ISSPIT. ISBN: 978-1-4673-0753-6, pp. 315-321.
- Holly, W., Cook, R. & Crowe, M., 1989. Reconciliation of Mass Flow Rate Measurements in a Chemical Extraction Plant. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67(4), pp. 595-601.
- Horowitz, G. & Alfie, E., 2010. *Monitoreo Inteligente de Procesos*. Madrid, España, YPF. ISBN: 978-0-11-133-645-1.
- Howard, R. & Cooper, D., 2010. A Novel Pattern Based Approach for Diagnostic Controller Performance Monitoring. *Control Engineering Practice*, 18, pp. 279-288.

- Huwang, L., Wang, Y., Xue, S. & Zou, C., 2014. Monitoring General Linear Profiles using Simultaneous Confidence Sets Schemes. *Computers & Industrial Engineering*, 68, pp. 1-12.
- IEC, 1990. *Rules for Steam Turbine Thermal Acceptance Tests, IEC 953-1*. Paris, France: International Electrotechnical Commission.
- Ilic, M., 2007. *From Hierarchical to Open Access Electric Power Systems*. Pittsburgh, U.S, En: Proceedings of the IEEE. ISBN: 978-19-0-0018-9219, pp. 1060-1084.
- Ilic, M. y otros, 1997. A Structure based Modeling and Control of Electric Power Systems. *Automatica*, 33(4), pp. 515-531.
- Isermann, R., 2005. Model Based Fault Detection and Diagnosis Status and Applications. *Annual Reviews in Control*, 29, pp. 71-85.
- Isermann, R. & Balle, P., 1997. Trends in the Application of Model Based Fault. *Control Engineering Practice*, 5(5), pp. 709-719.
- Jiang, X. & Foster, C., 2013. *Remote Thermal Performance Monitoring and Diagnostics - Turning Data Into Knowledge*. Boston, Massachusetts, USA, En: Proceedings of the ASME 2013 Power Conference, pp. 1-7.
- Jiang, X. & Foster, C., 2014. *Plant Performance Monitoring and Diagnostics Remote, Real Time and Automation*. Düsseldorf, Germany, En: Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, pp. 1-9.
- Johnstone, I., 1999. Wavelet Shrinkage for Correlated Data and Inverse Problems: Adaptivity Results. *Statistica Sinica*, 9, pp. 51-83.
- Johnstone, I. & Silverman, B., 1997. Wavelet Threshold Estimators for Data with Correlated Noise. *Journal of the Royal Statistical Society*, 59, Series B (Methodological), pp. 319-351.
- Kelly, J. & Hedengren, J., 2013. A Steady State Detection (SSD) Algorithm to Detect Non-Stationary Drifts in Processes. *Journal of Process Control*, 23, pp. 326-331.
- Kim, M., Yoon, S., Domanski, P. & Payne, W., 2008. Design of a Steady State Detector for Fault Detection and Diagnosis of a Residential Air Conditioner. *International Journal of Refrigeration*, 31, pp. 790 - 799.
- Koroliuk, V., 1984. *Manual de la Teoria de las Probabilidades y Estadística Matemática*. Moscu: MIR.
- Kurz, R., Brun, K. & Wollie, M., 2009. Degradation Effects on Industrial Gas Turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 131, pp. 062401- 062407.

- Kuwahara, T., Wibowo, B., Nakamura, M. & Yamane, Y., 2013. *Fouling Monitoring in Thermosiphon Reboiler*. Budapest, Hungary, En: Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning, pp. 453-456.
- Larsson, E. K., Mossberg, M. & Söderström, T., 2008. Estimation of Continuous-time Stochastic System. En: L. W. Hugues Garnier, ed. *Identification of Continuous Time Models from Sampled data*. Londres, U.K: Springer-Verlag London Limited. ISBN-13: 9781848001602, pp. 31-87.
- Le Roux, G. y otros, 2008. *Improving Steady State Identification*. Londres, En: 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 18, Elsevier, pp. 459-464.
- Leigh, A., Wong, A., Clausi, D. & Fieguth, P., 2011. *Comprehensive Analysis on the Effects of Noise Estimation Strategies on Image Noise*. Toronto, Canada, IEEE International Symposium on Multimedia. ISBN: 978-0-7695-4589-9.
- Lindsley, D., 2005. *Power Plant Control and Instrumentation: The Control of Boilers and HRSG Systems*. London, U.K: The Institution of Electrical Engineer. ISBN: 978-0-85296-565-9.
- Lipták, B. G., 2003. Volume I: Process Measurement and Analysis. En: *Instrument Engineers Handbook*. New York, U.S: Fourth Edition, The Instrumentation, Systems, and Automation Society, CRC-Press. ISBN: 978-0-8493-1083-0, pp. 1-149.
- Lu, S. & Hogg, B., 2000. Dynamic Nonlinear Modeling of Power Plant by Physical Principles and Neural Networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 22(1), pp. 67-78.
- Maffezzoni, C., 1997. Boiler Turbine Dynamics in Power Plant Control. *Control Engineering Practice*, 5(3), pp. 301-312.
- Mansour, M. & Ellis, J., 2008. Methodology of On Line Optimisation Applied to a Chemical Reactor. *Applied Mathematical Modelling*, 32, pp. 170-184.
- Markowski, M., Trafczynski, M. & Urbaniec, K., 2013. Identification of the Influence of Fouling on the Heat Recovery in a Network of Shell and Tube Heat Exchangers. *Applied Energy*, 102, pp. 755-764.
- Martinto, A. & García, A., 2012. *Pruebas de Comportamiento CTE “Lidio Ramón Pérez” (Felton) Unidad # 2*, Holguin, Cuba: Empresa de Ingeniería y Proyectos de la Electricidad, INEL.
- Mhamdi, A., Geffers, W., Flehmig, F. & Marquardt, W., 2010. On-line optimization of MSF desalination plants. En: *Desalination and Water Resources, Thermal*

- Desalination Processes, Vol I, UNESCO-EOLSS (Encyclopedia of Desalination and Water Resources)*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Pergamon, pp. 136-162.
- Narasimhan, S., Kao, C. & Mah, R., 1987. Detecting Changes of Steady States using Mathematical Theory of Evidence. *AIChE Journal*, 33, pp. 1930-1932.
- Neha, S., Vilankar, K. & Rhinehart, R., 2010. Type-II Critical Values for a Steady State Identifier. *Journal of Process Control*, 20, pp. 885-890.
- Nise, N., 2011. *Control Systems Engineering*. Massachusetts, U.S: Sixth Edition, John Wiley & Sons, Inc ©. ISBN: 13 978-0470-54756-4.
- Ozana, S., Pies, M. & Vazquez, L., 2011. Use of Methods of Statistic Dynamics Applied for Analysis of Steam Superheater. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 87, pp. 154-158.
- Özer , A. y otros, 2009. On the Teaching of Performance Evaluation and Assessment of a Combined Cycle Cogeneration System. *Journal of Energy Resources Technology*, 131, pp. 25501 - 25507.
- Palmero, M., 2011. *Informe de Tesis de Maestría: Herramienta para el Diagnóstico del Ciclo Térmico de la Empresa Termoeléctrica "Lidio Ramón Pérez"*, Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Peña , F. & Blanco, J., 2006. Evaluation of the Physical Dew Point in the Economizer of a Combined Cycle Burning Natural Gas. *Appl. Therm. Eng*, 27, pp. 2153-2158.
- Peña, B., Teruel, E. & Díez, L., 2010. Soft-Computing Models for Soot-Blowing Optimization in Coal Fired Utility Boilers. *Applied Soft Computing*, 11, pp. 1657-1668.
- Rayaprolu, K., 2009. *Boilers for Power and Process*. Florida, U.S: CRC-Press. ISBN-13: 978-1-4200-7537-3.
- Report, I.C, 1991. Dynamic Models for Fossil-Fuelled Steam Units in Power System Studies. *IEEE Trans. on Power Systems*, 6(2), pp. 753-761.
- Rhinehart, R., 2013. *Tutorial: Automated Steady and Transient State Identification in Noisy Processes*. Washington DC, Proceedings of the 2013 American Control Conference, pp. 4477-4493.
- Schlacher, K., 2009. *Newsletter: January and February*, Laxenburg, Austria: International Federation of Automatic Control (eds).

- Seborg, D., Edgar, T. & Mellichamp, D., 2004. Chapter 21 Process Monitoring. En: *Process Dynamics and Control*. Massachusetts,U.S: Second edition, John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-0471-00077-9, pp. 567-590.
- Shin, J. y otros, 2002. Analysis of the Dynamic Characteristics of a Combined Cycle Power Plant. *Energy*, pp. 1085-1098.
- Skogestad, S., 2004. Control Structure Design for Complete Chemical Plants. *Computers and Chemical Engineering*, 28, pp. 219 - 234.
- Skogestad, S., 2012a. Chapter 11 Economic Plantwide Control. En: V. kariwala, ed. *Plantwide Control: Recent Developments and Applications*. Chichester, U.K: John Wiley and Sons. ISBN: 978-0-470-98014-9, pp. 259-251.
- Skogestad, S., 2012b. Capítulo 5. Process Dynamics, Control, Monitoring, and Identification, 5.3.1 Plantwide Control. En: *Process Systems Engineering*. Weinheim, Germany: Chemistry, Ullmann's Encyclopedia of Industrial, John Wiley. ISBN: 978-352-73-0673-2, pp. 10-14.
- Smith, C., 2010. *Advanced Process Control: Beyond Single-Loop Control*. New Jersey, U.S: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-0-470-38197-7.
- Smuts, J., 2010. *Improving Boiler Stability Through Advanced Regulatory Control*, Texas,U.S: The International Society of Automation. ISBN: 978-0-360-78011-5, pp.10-27.
- Soleimani, H. & Govindan, K., 2014. Reverse Logistics Network Design and Planning utilizing Conditional Value at Risk. *European Journal of Operational Research*, 237, pp. 487-497.
- Stoppato, A., Mirandola, A. & Meneghetti, E., 2012. On the Operation Strategy of Steam Power Plants Working at Variable Load: Technical and Economic Issues. *Energy*, 37, pp. 228-236.
- Sundarraman, A. & Srinivasan, R., 2003. Monitoring Transitions in Chemical Plants using Enhanced Trend Analysis. *Computers and Chemical Engineering*, 27, pp. 1455-1472.
- Tan, W. & Zhou, H., 2012. Robust analysis of decentralized load frequency control for multi area power systems. *Electrical Power and Energy Systems*, 43, pp. 996 - 1005.
- Teir, S., 2003. *Steam Boiler Technology*. Helsinki, Finland: Second edition, Energy Engineering and Environmental Protection Publications. ISBN: 978-951-22-6759-4.

- Teruel, E., Cortés, C., Díez, L. I. & Arauzo, I., 2005. Monitoring and Prediction of Fouling in Coal Fired Utility Boilers using Neural Networks. *Chemical Engineering Science*, 60, p. 5035 – 5048.
- Thornhill, N. & Horch, A., 2007. Advances and New Directions in Plant Wide Disturbance Detection and Diagnosis. *Control Engineering Practice*, 15, pp. 1196-1206.
- Turner, P., Mittermeier, I. & Küchenhoff, H., 2014. How Long Does It Take to Build a Nuclear Power Plant? A Non Parametric Event History Approach with P-Splines. *Energy Policy*, 70, pp. 163-171.
- Tzu-Chi, L., Ming-Hsiu, H. & Kuo-Tung, L., 2011. Chiller Performance Curve, Online Modeling using B-Spline Curve. *Energy Engineering*, 108(6), pp. 46-58.
- Usón, S. & Valero, A., 2011. Thermo-economic Diagnosis for Improving the Operation of Energy Intensive Systems: Comparison of Methods. *Applied Energy*, 88, pp. 699 - 711.
- Vazquez, L., Aguilera, A., Fong, J. & Pérez, J., 2012b. *Relación entre la Fiabilidad de las Mediciones y la Estimación de la Eficiencia Energética en Generadores de Vapor*. Santiago de Cuba, En: II Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica y Energía 2012. Universidad de Oriente. ISBN: 978-959-207-488-0.
- Vazquez, L. & Llosas, Y., 2010. El Diagnóstico Energético de la Operación en Centrales Térmicas con el Monitoreo de los Índices de Sobreconsumo. *Revista Electrónica Ciencia en su PC*, 3, pp. 24-40.
- Vazquez, L., Llosas, Y., Díaz, D. & Recio, A., 2012a. *Regularización de Aspectos Multidisciplinarios para el Diagnóstico Operacional de Sistemas Térmicos a partir de Registros Históricos: Aplicación a Calderas*. Cienfuegos, 7 Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente. CEEMA, Universidad de Cienfuegos. ISBN: 978-959-257-323-9.
- Vázquez, L., Llosas, Y., Mazaira, I. & Byckó, B., 2009. Laboratorio Simulado de Generador de Vapor con Domo. *Revista Electrónica Ciencia en su PC*, 2, pp. 61-76.
- Vazquez, L. y otros, 2011. *Explorador Industrial Multivariable: Una Solución con MatLab para Minar Series Temporales*. La Habana, X Simposio Internacional de Automatización de la XIV Convención y Feria Internacional Informática 2011. ISBN: 978-959-7213-01-7.
- Vázquez, L. y otros, 2004. *Generador de Vapor con Domo: Reflexiones para sus Parámetros y Variables*. Habana, IX Congreso Latinoamericano de Control Automático, Convención Informática 2004, ISBN: 959-237-117-2.

- Vázquez, L., Ramírez , E. & Gómez, A., 2005. *Conjunto de Sugerencias para la Formación Universitaria de Ingenieros en Automática orientados a Centrales Eléctricas*. Asunción, Paraguay, XI Encuentro Regional IberoAmericano del CIGRE. No tiene ISBN.
- Vázquez, L., Trujillo, R., Llosas, Y. & Díaz, D., 2014. Método para Detección de Estados Estacionarios: Aplicación a Unidades de Generación Eléctrica. *Revista RIELAC*, 35(2), pp. 45-61.
- Vázquez, M., Vila, O. & Llanes, E., 2010. *Metodología de Cálculo de Sobreconsumos para la Central Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez (Felton)*, Holguin, Cuba: INEL.
- Villez, K. y otros, 2013. Qualitative Representation of Trends (QRT): Extended Method for Identification. *Computers and Chemical Engineering*, 48, pp. 187-199.
- Villez, K., Rosen, C., Duchesne, C. & Vanrolleghem, P., 2008. Qualitative Representation of Trends: An Alternative Approach to Process Diagnosis and Control. *Water Science & Technology*, 57(10), pp. 1525-1532.
- Wai, K., 2009. *Fundamentals of Circuits and Filters*. Florida, U.S: Thrid edition, CRC-Press. ISBN-13: 978-1-4200-5887-1.
- Welfonder, E., 1999. Dynamic Interactions Between Power Plants and Power Systems. *Control Engineering Practice*, pp. 27 - 40.
- Yang, M., Young, A., Niyetkalyev, A. & Crittenden, C., 2009. *Modelling the Fouling Induction Period*. Schladming, Austria, Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning VIII. On-line:heatexchanger-fouling.com.
- Yeh, M. & Chang, C., 2011. An Automation Based Approach to Evaluate and Improve Online Diagnosis Schemes for Multi-failure Scenarios in Batch Chemical Processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 89, pp. 2652-2666.
- Ye, L., Liu, Y., Fei , Z. & Liang, J., 2009. Online Probabilistic Assessment of Operating Performance based on Safety and Optimality Indices for Multimode Industrial Processes. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 48(24), pp. 10912-10923.

Anexo A

ANEXO A: FUNDAMENTO DEL MÉTODO DE RHINEHART

El método de Cao y Rhinehart (Cao y Rhinehart, 1995), (Cao y Rhinehart, 1997), (Neha y otros, 2010) se introduce a continuación.

Para el valor de la medida X , $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, considere el valor del filtrado discreto dado por:

$$x_{f,k} = \lambda_1 x_k + (1 - \lambda_1) x_{f,k-1} \quad (\text{A1.1})$$

Donde

x_k : Variable del proceso medida en el instante k

$x_{f,k}$: Valor filtrado de X en el instante k

$x_{f,k-1}$: Valor filtrado de X en el instante $k - 1$

λ_1 : es un factor del filtro.

La desviación al cuadrado de la media filtrada calculada a partir de los valores previamente filtrados $v_{f,k}^2$ se computa como sigue:

$$v_{f,k}^2 = \lambda_2 (x_k - x_{f,k-1})^2 + (1 - \lambda_2) v_{f,k-1}^2 \quad (\text{A1.2})$$

Donde

$v_{f,k}^2$: es el valor actual de la desviación al cuadrado de la media filtrada

$v_{f,k-1}^2$: es el valor previo de la desviación al cuadrado de la media filtrada

λ_2 : es un factor del filtro.

En tanto que la diferencia al cuadrado de las medias filtradas en datos sucesivos $d_{f,k}^2$ está dada por:

$$d_{f,k}^2 = \lambda_3 (x_k - x_{k-1})^2 + (1 - \lambda_3) d_{f,k-1}^2 \quad (\text{A1.3})$$

donde

$d_{f,k}^2$: Es la diferencia al cuadrado del valor actual filtrado de datos sucesivos.

$d_{f,k-1}^2$: Es la diferencia al cuadrado del valor previo de datos sucesivos.

λ_3 : es un factor del filtro.

A partir de las ecuaciones precedentes, el estadístico R , el cual podrá ser usado para averiguar la existencia del estado estacionario, se define como sigue:

$$R = \frac{(2 - \lambda_1)}{d_{f,k}^2} v_{f,k}^2 \quad (\text{A1.4})$$

El valor de R anterior se compara con valores críticos (R_{crit}). Estos han sido determinados y fundamentados por sus autores ofreciendo las siguientes condiciones:

$R > R_{sup}$, la muestra está en Estado Transitorio.

$R < R_{inf}$, la muestra está en Estado Estacionario.

$R_{inf} < R < R_{sup}$, no se tiene poder de decisión para ubicar la muestra en uno de los dos posibles estados

Anexo B

ANEXO B: FUNDAMENTO DEL MÉTODO DE KELLY Y HEDENGREN

La solución (Kelly y Hedengren, 2013) es del tipo basada en ventana deslizante.

Para el valor de la medida X , $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, considere su aproximación del siguiente modo:

$$x_k = mt + \mu + a_k \quad (\text{B1.1})$$

Donde:

mt : es la componente determinística de la deriva

μ : es la media del proceso hipotéticamente estacionario que representará a la media de las muestras o el promedio aritmético a lo largo de la ventana con pendiente cero.

a_k : representa al error en forma de una serie temporal aleatoria independiente e idénticamente distribuida (i.i.d) o secuencia de ruido blanco con media cero y desviación estándar σ_a .

k : Es un subíndice que el tiempo de muestreo a la cual se toma la muestra, mientras que mt se refiere a la pendiente multiplicada por el ciclo de conteo.

Se conoce (Box y Jenkins, 1976) que para series de tiempo que evolucionan de modo no estacionario y con deriva se cumple que la primera diferencia es:

$$x_k - x_{k-1} = m + a_k - a_{k-1} \quad (\text{B1.2})$$

donde

$a_k - a_{k-1}$: tiene por definición un valor esperado de cero con una desviación estándar de $2\sigma_a$. Este es el tipo más simple de proceso no estacionario y podrá ser empleado para modelar cualquier proceso en que exista acumulación ya sea porque exista cambio en el balance de flujos de las corrientes de entrada – salida, o de energía o de momentos.

Tomando primera diferencia de x_k es posible estimar (siempre y cuando a_t sea un ruido blanco i.i.d) la pendiente m de la componente de la deriva mt como la media aritmética de $x_k - x_{k-1}$ sobre los n valores igualmente espaciados dentro de la ventana. En este método la pendiente m será estimada por la media aritmética de las primeras diferencias en lugar de hacerlo por un ajuste de regresión lineal minimizando la suma de los errores al cuadrado. Esta estimación modela los cambios en la acumulación respecto al tiempo

$$m = \frac{1}{(W_s - 1)} \left[\sum_{k=1}^{W_s-1} (x_k - x_{k-1}) \right] \quad (B1.3)$$

$$\mu = \frac{1}{(W_s - 1)} \left[\sum_{k=1}^{W_s} x_k - m \frac{W_s(W_s + 1)}{2} \right] \quad (B1.4)$$

Ahora que existe para X , la estimación de m y μ , la desviación estándar, σ_a , en presencia de ruido blanco podrá ser determinada como sigue

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{(W_s - 2)} \left[\sum_{k=1}^{W_s} (x_k - mk - \mu)^2 \right]} \quad (B.5)$$

En este punto para cada ventana de W_s - muestras se prueban para cada muestra x_k las siguientes dos condiciones:

$$\text{Si } |x_k - \mu| \leq t_{crit}^M * \sigma_a \quad (B.6)$$

$$\text{Si } |x_k - \mu| \leq t_{crit}^m * \sigma_a \quad (B.7)$$

Las muestras x_k que satisfacen la ecuación (B.6) forman parte de un contador numérico denominado *uprb* y aquellas que satisfacen la ecuación (B.7) forman parte de un contador numérico denominado *lprb*. El valor t_{crit}^m es el valor de umbral crítico inferior de t-Student y t_{crit}^M es el valor de umbral crítico superior de t-Student

Para definir cuál es la condición del segmento de muestras a lo largo de W_s se introducen dos índices: *uprb* (que procede de la traducción del termino en inglés, por ciento de probabilidad superior de estar estacionario) y *lprb* (que procede de la traducción del termino en inglés, por ciento de probabilidad inferior de estar estacionario) cuyos resultados se expresan en % de W_s .

$$uprb = 100 \frac{uprb}{W_s} \quad (B.8)$$

$$lprb = 100 \frac{lprb}{W_s} \quad (B.9)$$

A partir de estos dos índices expresados, en porciento, se establecen las 3 condiciones siguientes:

Condición 1: Estado Estacionario (EE) ----- *lprb* > 90% *uprb*: **xx**

Condición 2: Débilmente Estado Estacionario (DEE) --- *lprb* < 90% y *uprb* > 90%

Condición 3: Estado Transitorio (ET) -----*uprb* < 90% y *lprb*: **xx**

Anexo C

ANEXO C: FUNDAMENTO DEL MÉTODO DE KIM

El algoritmo de segmentación está basado en el cálculo de parámetros estadísticos sobre ventanas deslizantes de ancho L tomadas sobre la serie temporal $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$.

En cualquier instante k la media de las L muestras más recientes viene dada por:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{L} \sum_{i=k-L+1}^k x_i \quad (\text{C.1})$$

Este valor se conoce como la media de ventana móvil porque el promedio en cada instante k -ésimo se calcula con el conjunto de L valores más reciente. Esta magnitud es equivalente a la producida por un filtro pasa bajo. Las medias móviles pueden obtenerse de manera computacionalmente eficiente a partir de la siguiente expresión que vincula la media de ventana móvil en el instante k con la media de ventana móvil en el instante precedente. En efecto de (C.1) se obtiene:

$$\bar{x}_k - \bar{x}_{k-1} = \frac{1}{L} \left[\sum_{i=k-L+1}^k x_i - \sum_{i=k-L}^{k-1} x_i \right] = \frac{1}{L} [x_k - x_{k-L}] \quad (\text{C.2})$$

$$\bar{x}_k = \bar{x}_{k-1} + \frac{1}{L} [x_k - x_{k-L}] \quad (\text{C.3})$$

La varianza de la ventana móvil en el instante k es:

$$v_k = \frac{1}{L-1} \sum_{i=k-L+1}^k (x_i - \bar{x}_k)^2 \quad (\text{C.4})$$

Una muestra x_N pertenece a un segmento de EE condición de umbral de $\pm 3\sigma$ respecto a la media del segmento.

Anexo D

ANEXO D: CÓDIGOS EN MATLAB

Se hace listan en bloques separados los siguientes códigos de MatLab para:

- D.1 Segmentación
- D.2 Rectificación de coordenadas de segmentos candidatos
- D.3 Verificación de la tolerancia de la media del segmento
- D.4 Determinación de coincidencias
- D.5 Determinación de sucesión de desviaciones
- D.6 Agrupación de sucesión de desviaciones
- D.7 Estimación de la varianza del ruido en las mediciones
- D.8 Extracción de tendencia mediante media móvil
- D.9 Estimación del factor de auto-correlación γ
- D.10 Método de Detección de Estado Estacionario RTest
- D.11 Método de Detección de Estado Estacionario JTest
- D.12 Determinación de los errores Tipo I y II

D.1 Segmentación

```
siz=str2double(get(handles.Wsize,'string'));           % ancho de ventana
final=length(variable);                               % longitud de la muestra
k1=1;                                                 % inicio de la ventana
k2=k1+siz;                                           % fin de la ventana
NumSS=1;                                             % contador de estado estacionario
while k2<final                                       % mientras no se llegue al final
    if std(variable(k1:k2))< stand                   % Condición del Filtro SS
        K1(NumSS)=k1;                                % posición inicial del QSS i en la muestra
        while std(variable(k1:k2))< stand && k2<final % seguir preguntando condición de Filtro
            k2=k2+1;                                  % aumentar K2
        end
        K2(NumSS)=k2;                                % posición final del QSS i en la muestra
        NumSS=NumSS+1;                               % aumentar contador de SS
        k1=1+k2;                                     % ubica el comienzo de la ventana al final de k2
        k2=k1+siz;                                   % nuevo fin de ventana
    else                                             % si no se cumple condición de EE
        k1=k1+1;                                     % seguir avanzando
        k2=k1+siz;
    end
end
```

D.2 Rectificación de coordenadas de segmentos candidatos

```
for j=1:length(K1)                                   % desde 1 hasta longitud de la muestra
    med=mean(variable(K1(j):K2(j)));                 % determinar valor medio
    for i=K1(j):K2(j)                                % desplazamiento desde izquierda
```

```

if (medio(i)<=med+ErrR) && (medio(i)>=med-ErrR) % si media está dentro de rango de error
    K1(j)=i; % fijar nuevo valor rectificado de K1
    break % salir del ciclo
end % terminar
end
for i=K2(j):-1:K1(j) % desplazamiento desde derecha
    if (medio(i)<=med+ErrR) && (medio(i)>=med-ErrR) % si media está dentro de rango de error
        K2(j)=i; % fijar nuevo valor ractificado de K1
        break % salir del ciclo
    end % terminar
end
end
end

```

D.3 Verificación de la tolerancia de la media del segmento

```

err=str2double(get(handles.edit54,'string')); % capturar error permitido por teclado
long=length(K1); % longitud de la matriz de SS
for i=1:long % recorrer toda la muestra
    rango=result(K1(i):K2(i)); % tomar segmento candidato
    m(i)=mean(rango); % hallarle valor medio
    A(i)=abs(m(i)-min(rango)); % restar media -valor mínimo de segmento
    B(i)=abs(m(i)-max(rango)); % restar media -valor mínimo de segmento
end % terminar
con=0; % inicializar contador en cero
for i=1:length(K1) % moverse a lo largo del segmento
    if A(i)<=err && B(i)<=err % si estos valores están dentro del rango de error permitido
        con=con+1; c(con)=i; % aumentar el contador y crear vector con estas posiciones
    end % terminar
end
for i=1:length(c) % moverse desde 1 hasta la longitud del vector de posiciones
    KK1(i)=K1(c(i)); % fijar nuevos valores de inicio de segmento
    KK2(i)=K2(c(i)); % fijar nuevos valores de fin de segmento
end
end
Kfinal=[KK1' KK2']; % confeccionar matriz con valores de inicio y fin de segmento

```

D.4 Determinación de coincidencias

```

%convertir matriz a vector unidimensional de 1's y 0's
for i=1:Longitud % variable 1
    Vector(Coord_1(i,1):Coord_1(i,2))=1;
end
co(1,:)=Vector;
for i=1:Longitud % variable 2
    Vector(Coord_2(i,1):Coord_2(i,2))=1;
end
co(2,:)=Vector;
for i=1:Longitud % variable 3
    Vector(Coord_3(i,1):Coord_3(i,2))=1;
end
co(3,:)=Vector;
for i=1:Longitud % variable 4
    Vector(Coord_4(i,1):Coord_4(i,2))=1;
end
co(4,:)=Vector;
for i=1:Longitud % variable 5
    Vector(Coord_5(i,1):Coord_5(i,2))=1;
end
co(5,:)=Vector;
for i=1:Longitud % variable 6
    Vector(Coord_6(i,1):Coord_6(i,2))=1;
end
co(6,:)=Vector;

```

```

for i=1:Longitud                                     % variable 7
    Vector(Coord_7(i,1): Coord_7(i,2))=1;
end
co(7,:)=Vector;
for i=1:Longitud                                     % variable 8
    Vector(Coord_8(i,1): Coord_8(i,2))=1;
end
co(8,:)=Vector;
for i=1:length(co)                                   % hacer AND lógico entre todos los vectores unidimensionales
    f(i)=co(1,i)& co(2,i)& co(3,i)& co(4,i)& co(5,i)& co(6,i)& co(7,i)& co(8,i);
end
j=1; cont=1;
% convertir vector a matriz [Ki Kf]
for i=1:length(f)
    if (f(i)==0)&&(cont>1)                            % si valor es igual a 0
        j=j+1;                                        % no hacer nada y seguir avanzando
        cont=1;
    end
    if (f(i)==1)                                      % si valor es igual a 1
        if cont==1
            Coord(j,1)=i;                            % fijar coordenada de inicio de segmento
        else                                          % si es igual a cero
            Coord(j,2)=i;                            % fijar coordenada de fin de segmento
        end
        cont=cont+1;
    end
end
end

```

D.5 Detección de desviaciones

```

[A B C]=xlsread(filename);                          % leer de archivo Excel
Nombres=B;                                          % obtener nombres de variables
Valores=A;                                          % obtener valores de variables
namesR{1}=Nombres(1,1);                            % obtener nombres de la referencia
namesR{2}=Nombres(1,2);                            % obtener nombres de las mediciones
Rel_Sel=[cell2mat(namesR{1}),'---',cell2mat(namesR{2})]; % concatenar nombres de referencia
Depend=pchip(Valores(:,1),Valores(:,2));           % crear el archivo de relación entre las variables
Relacion =struct('Pchip',{0},'ValoresX',{0},'ValoresY',{0}); % crear estructura con resultados de interpolación

```

D.6 Agrupación de desviaciones

```

Ref_X=handles.Relacion.ValoresX;                   % obtener referencia (eje X)
Ref_Y=handles.Relacion.ValoresY;                   % obtener referencia (eje Y)
plot(Ref_X,Ref_Y,'Color','k','MarkerSize',5)      % graficar la referencia
Cantidad=str2double(get(handles.edit3,'string'));  % obtener cantidad de días que se va a agregar
Grupo=get(handles.popupmenu5,'value');             % obtener selección de usuario
if Grupo==1                                        % si se selecciona días
    SumaDias=Cantidad;                             % tomar esa misma cantidad
elseif Grupo==2                                    % si se selecciona semanas
    SumaDias=Cantidad*7;                           % multiplicar por 7
elseif Grupo==3                                    % si se selecciona meses
    SumaDias=Cantidad*30;                          % multiplicar por 30
elseif Grupo==4                                    % si se selecciona años
    SumaDias=Cantidad*365;                          % multiplicar por 365
end
% se obtienen los datos de la variable bajo análisis
Valores=handles.Valores;
FechaM=handles.FechaM;
% Capturar Fecha de Inicio
Val=get(handles.edit14,'string');
FechaIni=Val;
nombrevar=get(handles.popupmenu9,'string');
numerovar=get(handles.popupmenu9,'value');

```

```

%contatenar hora y fecha
Val=nombrevar{numerovar}; FechaIni=[FechaIni,' ',Val];
Val=get(handles.edit15,'string'); FechaIni=[FechaIni,' ',Val];
Val=get(handles.edit16,'string'); FechaIni=[FechaIni,' ',Val];
Val=get(handles.edit17,'string'); FechaIni=[FechaIni,' ',Val];
Val=get(handles.edit18,'string'); FechaIni=[FechaIni,' ',Val,':','000'];

% Capturar Fecha de Final
Val=get(handles.edit19,'string');
FechaFin=Val;
nombrevar=get(handles.popupmenu10,'string');
numerovar=get(handles.popupmenu10,'value');
%contatenar hora y fecha
Val=nombrevar{numerovar}; FechaFin=[FechaFin,' ',Val];
Val=get(handles.edit20,'string'); FechaFin=[FechaFin,' ',Val];
Val=get(handles.edit21,'string'); FechaFin=[FechaFin,' ',Val];
Val=get(handles.edit22,'string'); FechaFin=[FechaFin,' ',Val];
Val=get(handles.edit23,'string'); FechaFin=[FechaFin,' ',Val,':','000'];

[CodigoF]=Codes(FechaM); % convertir fecha a un código numérico utilizando función Codes
[CodeI]=Codes(cellstr(FechaIni)); % convertir fecha inicial
[CodeF]=Codes(cellstr(FechaFin)); % convertir fecha final
in=1;
fin=length(CodigoF);
for i=1:length(CodigoF)
    if CodigoF(i)>=CodeI % si código de fecha bajo análisis es mayor que la de inicio de grupo
        in=i; % fijar posición de inicio de grupo actual
        break % salir
    end
end
for i=1:length(CodigoF)
    if CodigoF(i)>=CodeF % si código de fecha bajo análisis es mayor que la de fin de grupo
        fin=i-1; % fijar posición de fin de grupo actual
        break % salir
    end
end
FechaMM=FechaM(in:fin); % fijar rango de fechas de grupo actual
[Grupos Leyenda NameFila NameGrupo]=Agrupar_Fechas(Valores,FechaMM,SumaDias); % función que agrupa las fechas

% plotear los diferentes grupos
N_Graf=fieldnames(Grupos);
N_Graf=length(N_Graf);
for r=1:N_Graf
    Nombre=['Group_',mat2str(r)];
    X=Grupos.(Nombre).X;
    Y=Grupos.(Nombre).Y;
    [B,IX]=sort(X);
    Tam=size(IX);
    Tam=Tam(1,1);
    for i=1:Tam
        Val=IX(i,1);
        XTemp(i,:)=X(Val,:);
        YTemp(i,:)=Y(Val,:);
    end
    X=XTemp;
    Y=YTemp;
    clear XTemp;
    clear YTemp;
    plot(X,Y,'MarkerSize',5)
    Col=Col+1;
end
End

```

D.7 Estimación de la varianza del ruido en las mediciones

```

[C,L]=wavedec(variable,4,'db4'); % transformada wavelet con 4 niveles de descomposición
D1=detcoef(C,L,1); % determinar 1er coeficiente

```

```

mad1=median(abs(D1)); % determinar promedio
D2 = detcoef(C,L,2); % determinar 2do coeficiente
mad2=median(abs(D2)); % determinar promedio
D3 = detcoef(C,L,3); % determinar 3er coeficiente
mad3=median(abs(D3)); % determinar promedio
D4 = detcoef(C,L,4); % determinar 4to coeficiente
mad4=median(abs(D4)); % determinar promedio
sigma=1/(4*0.6745)*(median(abs(D1))+median(abs(D2))+median(abs(D3))+median(abs(D4)));
% promedio de las media móvil

```

D.8 Extracción de tendencia mediante media móvil

```

a=ancho/2; % ancho que se le va a agregar (ancho/2)
for i=1:ancho/2
    nuev(i)=variable(a); % crear espejo de variable al inicio de longitud (ancho/2)
    a=a-1;
end
a=length(variable); % final de la variable
for i=1:ancho/2
    nuev2(i)=variable(a); % crear espejo de variable al final de longitud (ancho/2)
    a=a-1;
end
bvariable2=vertcat((nuev)',variable,(nuev2)); % unirle segmentos al inicio y al final de la variable original
k1=1; % fijar inicio de ventana
k2=k1+ancho; % fijar fin de ventana
for i=1:length(bvariable2)-ancho
    media(i)=mean(bvariable2(k1:k2)); % hallarle media a nueva variable
    k1=k1+1; % desplazar inicio de ventana
    k2=k1+ancho; % desplazar fin de ventana
end
end

```

D.9 Estimación del factor de auto-correlación γ

```

k1=1;
[ACF,Lags,Bounds]=autocorr(variable,length(variable)-1,length(variable)/2); % hallar la auto-correlación de la variable
% determinación de valores propios
for i=1:length(ACF) % moverse por vector de valores propios
    if ACF(i)>Bounds(2) && ACF(i)<Bounds(1) % si ACF está dentro de los límites
        ACF2(i)=0; % hacerlo cero
    else % sino
        ACF2(i)=ACF(i); % dejarlo igual
    end
end
for i=1:length(ACF2) % moverse a través de toda la matriz ACF2
    for j=1:length(ACF2)
        P(i,j)=ACF2(1+abs(i-j)); % hallar matriz de auto-correlación
    end
end
VP=eig(P); % determinar los valores propios de la matriz

```

D.10 Método de Detección de Estado Estacionario RTest

```

if get(handles.popupmenu13,'value')==1 % a solicitud del usuario
    def=1; % ubicar muestras indeterminadas como estacionarias
else
    def=0; % ubicar muestras indeterminadas como no estacionarias
end
final=length(variable); % longitud de la muestra
x=variable;

```

```

x0f=x(1); % tomar 1er valor filtrado como 1er valor de la muestra
v0=0;
D0=0;
L1=str2double(get(handles.edit24,'string')); % capturar 1er factor del filtro por teclado
L2=str2double(get(handles.edit28,'string')); % capturar 2do factor del filtro por teclado
L3=str2double(get(handles.edit68,'string')); % capturar 3er factor del filtro por teclado
cont1=0; % inicializar contadores en cero
cont2=0;
for i=1:length(x)-1 % moverse a través de la longitud de la muestra
    x1=x(i+1); % ir actualizando valores
    x1f(i)=L1*x1+(1-L1)*x0f; % calcular valor filtrado de X en instante k
    v1=L2*(x1-x0f)^2+(1-L2)*v0; % calcular valor actual al cuadrado de la desviación de la media filtrada en
instante k
    D1=L3*(x1-x(i))^2+(1-L3)*D0; % calcular diferencia al cuadrado del valor actual filtrado en instante k
    R(i)=(2-L1)*v1/D1; % calcular estadístico R
    x0=x1; % actualizar valores para instante k+1
    x0f=x1f(i);
    v0=v1;
    D0=D1;
end
R=R(10:length(R)); % por criterio, desechar las 10 1ras muestras
vari(1:10)=def; % las 10 1ras muestras asignarlas según selección del usuario
for i=1:length(R) % moverse a lo largo del vector R
    if R(i)>1.3 % si R>umbral superior (1.3)
        cont1=cont1+1; % aumento contador de estado transitorio
        vari(i+10)=0; % se va creando vector relleno con cero
    elseif R(i)<0.8 % si R<umbral inferior (0.8)
        cont2=cont2+1; % aumento contador de estado estacionario
        vari(i+10)=1; % se va creando vector relleno con uno
    else % si R esta entro los 2 umbrales
        vari(i+10)=def; % se va creando vector relleno con valor definido por usuario
    end
end
end

```

D.11 Método de Detección de Estado Estacionario JTest

```

Ws=str2double(get(handles.edit28,'string')); % ancho de ventana
factor1=final/Ws; % cantidad de ventanas=cantidad de muestras/ancho de ventana
factor=round(factor1);
difer=final-(Ws*factor); % cantidad de muestras sobrantes si factor1 no es entero
KK1=1; % inicio de ventana
KK2=KK1+Ws-1; % fin de ventana
for j=1:factor % ciclo desde 1 hasta cantidad de ventanas
    variable=variableO(k1:k1+Ws-1); % tomar j-esima ventana
    ltc=2.0; % tc crítica inferior (2)
    utc=3.0; % tc crítica superior (3)
%----- (M) Componente determinística de la deriva
    Suma=0;
    for i=1:Ws-1
        Suma=(variable(i+1)-variable(i))+Suma; % suma acumulativa de todos los valores
    end
    M=Suma/(Ws-1); % se guarda en la variable M
%----- (MN) Media aritmética de las muestras con pendiente cero
    Suma2=0;
    for i=1:Ws
        Suma2=variable(i)+Suma2; % suma acumulativa de todos los valores
    end
    MN=1/(Ws-1)*(Suma2-M*(Ws*(Ws+1))/2); % se guarda en la variable MN
%----- (SD) Desviación estándar-----
    Suma3=0;
    for i=1:Ws
        Val=(variable(i)-(M*i)-MN); % suma acumulativa de todos los valores
        Val=Val*Val;
        Suma3=Suma3+Val;
    end
end

```

```

Res=Suma3/(Ws-2);
SD=sqrt(Res); % se guarda en variable SD
lprb1=0; % inicializar en cero el por ciento de probabilidad inferior de estar estacionario
(lprb)
uprb1=0; % inicializar en cero el por ciento de probabilidad superior de estar estacionario
(uprb)
for i=1:Ws % moverse a través de toda la ventana
    if abs(variable(i)-MN)<=(utc*SD) % si valor actual-media<tc superior*SD
        uprb1=uprb1+1; % aumentar en 1 contador de uprb
        if abs(variable(i)-MN)<=(ltc*SD) %si valor actual-media<tc inferior*SD
            lprb1=lprb1+1; % aumentar en 1 contador de lprb
        end
    end
end
lprb(j)=lprb1/Ws*100; % llevar lprb a escala 0-100
uprb(j)=uprb1/Ws*100; % llevar uprb a escala 0-100
if lprb(j)>90 % si se satisface condición de estado estacionario (SS)
    if j==1
        cont1=Ws; % aumentar contador 1
    else
        cont1=cont1+Ws;
    end
    vari(KK1:KK2)=1; % crear vector de ancho=ancho de ventana asignándole valor 1
    SSi(j)=KK1; % obtener coordenada inicial
    SSf(j)=KK2; % obtener coordenada final
elseif lprb(j)<90 && uprb(j)>90 % si se cumple condición de cuasi-estacionariedad (CSS)
    if j==1
        cont2=Ws; % aumentar contador 2
    else
        cont2=cont2+Ws;
    end
    vari(KK1:KK2)=def; % crear vector de ancho=ancho de ventana asignándole valor definido por usuario
elseif uprb(j)<90 % si se cumple condición de no estacionalidad (TS)
    if j==1
        cont3=Ws; % aumentar contador 3
    else
        cont3=cont3+Ws;
    end
    vari(KK1:KK2)=0; % crear vector de ancho=ancho de ventana asignándole valor 0
else % si no se detectan ningunas de las condiciones anteriores
    cont4=cont4+1; % aumentar contador 4
    vari(KK1:KK2)=def; % crear vector de ancho=ancho de ventana asignándole valor definido por usuario
end
k1=k1+Ws-1; % posicionar inicio de próxima ventana a continuación del final de la actual
lprb2(KK1:KK2)=lprb1/Ws*100; % llevar lprb a escala 0-100
uprb2(KK1:KK2)=uprb1/Ws*100; % llevar uprb a escala 0-100
KK1=KK2+1;
KK2=KK1+Ws-1;
end

```

D.12 Determinación de los errores Tipo I y II

```

ref=handles.S1; % obtener referencia para hacer la comparación
vec=evalin('base','ClasificacionEstados'); % obtener vector de 0's y 1's resultado del procesamiento
todos=xor(ref,vec); % operación lógica XOR para determinar las posiciones en las que difieren los resultados
%-----Error Tipo I-----
uno=and(todos,ref); % operación lógica AND con la referencia para determinar error tipo I
posuno=find(uno); % determinar en cuales posiciones se da este error
cantuno=length(posuno); % determinar la cantidad de este tipo de errores
%-----Error Tipo II-----
dos=and(todos,not(ref)); % operación lógica AND con la referencia negada para determinar error tipo II
posdos=find(dos); % determinar en cuales posiciones se da este error
cantdos=length(posdos); % determinar la cantidad de este tipo de errores

```

Anexo E:

ANEXO E: CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE VARIABLES

Tabla E.1: Criterios para la selección de las variables de subprocesos

Subprocesos y equipos
Mediciones portadoras de información de la posible existencia de deterioros.
Calentamiento del combustible desde el almacenamiento hasta quemadores.
Presión y temperatura de vapor al serpentín del tanque Presión y temperatura del vapor al calentador Temperatura del combustible a la salida de los calentadores de la casa de combustible Temperatura del combustible a la salida del calentador pico de caldera (que se establece por el laboratorio de química después de un análisis diario químico del combustible para lograr la viscosidad de trabajo en quemadores de 2,50E) Viscosidad del combustible
Bombeo del combustible
Corriente efectiva en las bombas impulsoras. Presión de succión de las bombas de combustible Presión de descarga de las bombas de combustible. Presión de petróleo y flujo de entrada a cada caldera Temperatura del combustible
Suciedad en filtros de combustible
Diferencia de presión antes y después del filtro Nivel de combustible en tanque de almacenamiento. Temperatura del combustible pre-calentado Flujo de Combustible Caída presión del combustible a la salida de la casa de combustible
En la atomización y mezclado en quemadores para la combustión.
Composición química del petróleo. Composición química de gases. Temperatura del aire y temperatura del petróleo para la combustión. Proporción de flujos de masa del aire y del combustible y su relación con la potencia de salida. Flujo y presión en la línea del vapor de atomización al quemador. La relación de presión entre el vapor de atomización al quemador y la presión del combustible. Flujo de aire a fotoceldas Apertura del regulador de presión de vapor de atomización
Suciedades, infiltraciones y fugas de aire en el CAR
Las diferencias de medidas en presión relativas unas de otras desde las tomas que existan sobre aire desde salida VTF y sobre gases desde el horno hasta su salida por la chimenea. Presión en el horno. Presión y flujo del aire del VTF. Diferencia de presión entre el horno y la caja de los quemadores. Temperatura del metal de los sobrecalentadores

<p>Temperatura y presión de los gases de salida y entrada del CAR. Temperatura del aire a la entrada y a la salida del CAR La monitorización de infiltraciones mediante la composición de oxígeno libre en los gases de salida del ECO, a la entrada y salida de CAR y salida del VTI. % Apertura de compuertas del VTF y % Apertura de compuertas de los VTI. Corriente consumida en VTF, VTI. La relación de ésta con los % de aperturas permite observar de insuficiencia de capacidad estos ventiladores Revoluciones de giro del CAR. Temperatura sobre vapor antes y después de las diferentes etapas de atemperamiento. % de aperturas indicadas por los reguladores de control de flujo de atemperamiento y los flujos de vapor que resultan. Temperatura del vapor sobrecalentado y recalentado a la salida de la caldera.</p>
VTF, VRG, VTI
<p>Temperatura en chumacera, en rodamientos. % de Apertura de las compuertas de los tiros Flujo aire en Venturi Flujo gases VRG Corriente efectiva de los motores de ventiladores de tiros y su relación con el % de apertura de las compuertas respectivas. Temperatura del devanado del motor</p>
Calentadores de Alta Presión.
<p>Temperatura del agua a la entrada y a la salida Presión del vapor en la extracción de cada calentador Nivel de drenaje en cada calentador Nivel de agua</p>
Atemperamientos de vapor recalentado y sobrecalentado
<p>Temperatura de vapor sobrecalentado Temperatura de vapor recalentado Flujos de agua a las inyecciones.</p>
Bomba de Agua de Alimentar
<p>Temperatura de aceite. Temperatura de devanado del motor Presión y flujo de descarga.</p>
Calentadores de Baja Presión
<p>Niveles de los calentadores y temperaturas de entrada y salida de los mismos. Presión de vapor de las extracciones de la turbina</p>
Economizador
<p>Temperatura antes y después del ECO, Diferencial de presión en corrientes de gases.</p>
Condensador de Vacío
<p>Nivel en el condensador, Presión absoluta del condensador. Temperatura de escape del vapor Temperatura de agua de mar entrada y salida del condensador Diferencia termica terminal .</p>
Domo.
<p>Nivel, presión y flujo de vapor a la salida.</p>
Turbina
<p>Presión del vapor ante turbina y flujo de vapor Temperatura del vapor sobrecalentado y recalentado.</p>

Tabla E.2: Referencias de las variables de la GV que intervienen en el cálculo de índices de sobreconsumo

<i>Valores de consigna para la monitorización</i>	<i>Regulaciones normadas</i>
$T_{SSH4ref} = 525 \text{ }^\circ\text{C}$	$(T_{SSH4(l)}, T_{SSH4(r)} \leq T_{SSH4ref})$
$T_{SRH2ref} = 525 \text{ }^\circ\text{C}$	$(T_{SRH2(l)}, T_{SRH2(r)} \leq T_{SRH2ref})$
$P_{sref} = 13,24 \text{ MPa}$	$P_s \leq P_{sref}$
$T_{gref}(\text{ }^\circ\text{C}) = 0,074N_p + 140,77$	$(T_{g(l)}, T_{g(r)} \leq T_{gref})$
$T_{w(eco)}(\text{ }^\circ\text{C}) = 7,10^{-6}N_p^3 - 0,0027N_p^2 + 0,3682N_p + 201$	$(T_{w(eco)} \leq T_{w(eco)ref})$

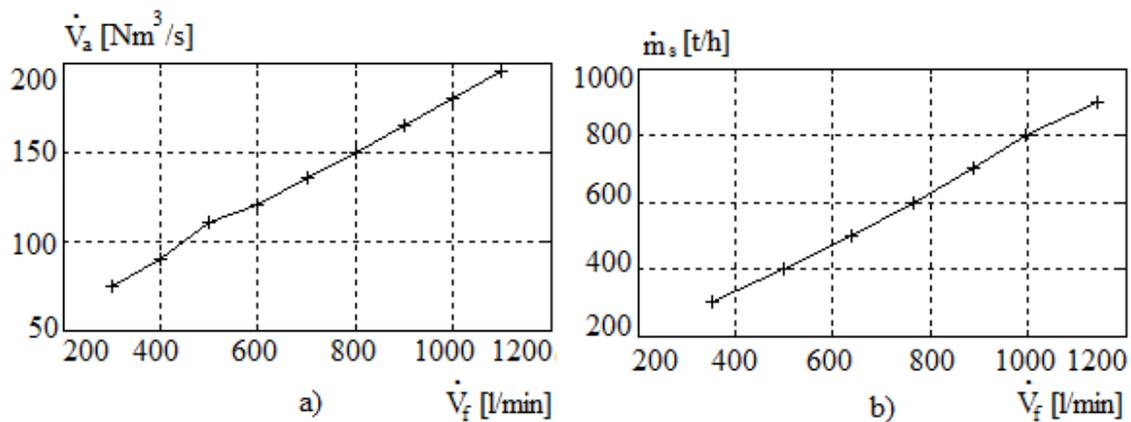


Figura E.1: Relaciones de buen funcionamiento; a) estequiometría y b) de evaporación

Anexo F

ANEXO F: GENERADOR DE VAPOR DE LA UNIDAD DOS

La figura F.1 indica la ubicación relativa de los subprocesos del GV (no está a escala).

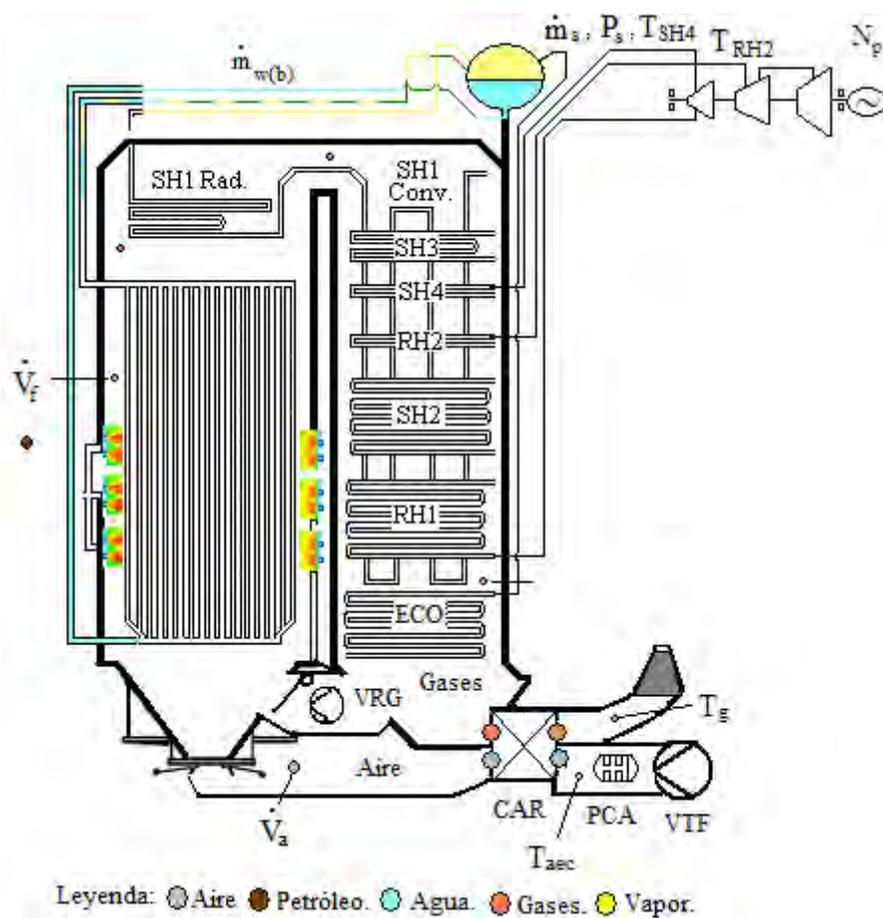


Figura F1.1: GV de la unidad dos de Felton

Tabla F.1: Listado de variables de los experimentos

Nomenclatura.	Etiqueta.	U/M	Significado
N_p	LCM51TCA	[MW]	Potencia activa de la unidad.
\dot{V}_f	PE10F201	[l/min]	Flujo volumétrico de combustible al generador de vapor.
\dot{V}_a	NG00F801	[Nm ³ /s]	Flujo volumétrico de aire a los quemadores.
$\dot{m}_{w(b)}$	RL50F801	[Ton/h]	Flujo en masa del agua al generador de vapor.
$T_{w(eco)}$	RL50T202	[°C]	Temperatura a la entrada del economizador.
$\dot{m}_{s(l)}$	RA01F801 (A)	[Ton/h]	Flujo en masa del vapor sobrecalentado que sale de SH4 (izquierdo).
$\dot{m}_{s(r)}$	RA02F801 (B)	[Ton/h]	Flujo en masa del vapor sobrecalentado que sale de SH4 (derecho).
P_s	PCM51TCA	[MPa]	Presión de vapor principal a la entrada del cilindro de alta presión CAP.
$T_{SSH4(l)}$	NA41T801 (A)	[°C]	Temperatura del vapor que deja SH4 (izquierdo).
$T_{SSH4(r)}$	NA42T801 (B)	[°C]	Temperatura del vapor que deja SH4 (derecho).
$T_{SRH2(l)}$	NE21T801	[°C]	Temperatura del vapor que deja RH2 (izquierdo).
$T_{SRH2(r)}$	NE22T801	[°C]	Temperatura del vapor que deja RH2 (derecho).
$T_{g(l)}$	NR10T207 (A)	[°C]	Temperatura en la chimenea de los gases de salida (izquierdo).
$T_{g(r)}$	NR20T207 (B)	[°C]	Temperatura en la chimenea de los gases de salida (derecho).
$X_{VTF(l)}$	NG10G201 (A)	%	Apertura de compuerta entrada de aire (izquierdo).
$X_{VTF(r)}$	NG20G201 (B)	%	Apertura de compuerta entrada de aire (derecho).
$X_{VRG(l)}$	NS10G201 (A)	%	Apertura de compuerta entrada de recirculación de gases (izquierdo).
$X_{VRG(r)}$	NS20G201 (B)	%	Apertura de compuerta entrada de recirculación de gases (derecho).
$P_{e(l)}$	NG10P201	[kPa]	Presión de aire a la salida del VTF

			(izquierdo).
$P_{e(r)}$	NG20P201	[kPa]	Presión de aire a la salida del VTF (derecho).
$P_{h(1)}$	NR00P203	[kPa]	Presión de gases en el horno.
$P_{h(2)}$	NR00P204	[kPa]	Presión de gases en el horno.
$P_{h(3)}$	NR00P205	[kPa]	Presión de gases en el horno.
$P_{ec(l)}$	NR10P205	[kPa]	Presión de gases a la entrada del CAR (izquierdo).
$P_{ec(r)}$	NR20P205	[kPa]	Presión de gases a la entrada del CAR (derecho).
$P_{sc(l)}$	NR10P206	[Pa]	Presión de gases a la salida del CAR (izquierdo).
$P_{sc(r)}$	NR20P206	[Pa]	Presión de gases a la salida del CAR (derecho).
$T_{gee(l)}$	NR10T210	[°C]	Temperatura de los gases ante del ECO (izquierdo).
$T_{gee(r)}$	NR20T210	[°C]	Temperatura de los gases ante del ECO (derecho).
$T_{gec(l)}$	NR10T208	[°C]	Temperatura de los gases a la entrada del CAR (izquierdo).
$T_{gec(r)}$	NR20T208	[°C]	Temperatura de los gases a la entrada del CAR (derecho).
$T_{aec(l)}$	NG10T211	[°C]	Temperatura del aire a la entrada del CAR (izquierdo).
$T_{aec(r)}$	NG20T211	[°C]	Temperatura del aire a la entrada del CAR (derecho).
$T_{asc(l)}$	NG10T213	[°C]	Temperatura del aire a la salida del CAR (izquierdo).
$T_{asc(r)}$	NG20T213	[°C]	Temperatura del aire a la salida del CAR (derecho).

Tabla F.2: Listado de características de sensores por variables

Etiqueta	Modelo	Rango	Resolución
LCM51TCA	ARDETEM TIPO: TRM3	0 – 311,76	±0.05%
PE10F201	ROTAMAS TIPO: RCCF31 + RCCS3	0 - 1332	±0.05%
NG00F801	Rosemount serie 3051S	37.14	±0.075%
RL50F801	Rosemount serie 3051S	0 - 1000	±0.075%
RL50T202	RTD doble PT100	0 - 300	±0.05 ohms
RA01F801 (A)	Rosemount serie 3051S	0 - 1000	±0.075%
RA02F801 (B)	Rosemount serie 3051S	0 - 1000	±0.075%
PCM51TCA	Rosemount serie 3051S	0 - 20	±0.075%

NA41T801 (A)	Termopar K	0 - 600	Min. Span 2mV
NA42T801 (B)	Termopar K	0 - 600	Min. Span 2mV
NE21T801	Termopar K	0 - 550	Min. Span 2mV
NE22T801	Termopar K	0 - 550	Min. Span 2mV
NR10T207 (A)	RTD doble PT100	0 - 300	±0.05 ohms
NR20T207 (B)	RTD doble PT100	0 - 300	±0.05 ohms
NG10G201 (A)	CPT01	0 - 100	±0.01%
NG20G201 (B)	CPT01	0 - 100	±0.01%
NS10G201 (A)	CPT01	0 - 100	±0.01%
NS20G201 (B)	CPT01	0 - 100	±0.01%
NG10P201	Rosemount serie 3051S	0 - 13	±0.075%
NG20P201	Rosemount serie 3051S	0 - 13	±0.075%
NR00P203	Rosemount serie 3051S	0 - 6	±0.075%
NR00P204	Rosemount serie 3051S	0 - 6	±0.075%
NR00P205	Rosemount serie 3051S	0 - 6	±0.075%
NR10P205	Rosemount serie 3051S	0 - 8	±0.075%
NR20P205	Rosemount serie 3051S	0 - 8	±0.075%
NR10P206	Rosemount serie 3051S	-250 a 300	±0.075%
NR20P206	Rosemount serie 3051S	-250 a 300	±0.075%
NR10T210	Termopar K	0 - 650	Min. Span 2mV
NR20T210	Termopar K	0 - 650	Min. Span 2mV
NR10T208	Termopar K	0 - 500	Min. Span 2mV
NR20T208	Termopar K	0 - 500	Min. Span 2mV
NG10T211	RTD doble PT100	0 - 160	±0.05 ohms
NG20T211	RTD doble PT100	0 - 160	±0.05 ohms
NG10T213	RTD doble PT100	0 - 400	±0.05 ohms
NG20T213	RTD doble PT100	0 - 400	±0.05 ohms

Tabla F.3: Características de sistema de adquisición y procesamiento

Sistema de Adquisición de Datos	Modelo
Sistema de Control Distribuido	ZAT-2000MP (Estaciones de Campo)
Tarjetas de Procesamiento	VM42 y DVDP
Sistema de Supervisión (SCADA)	INTOUCH 9.0

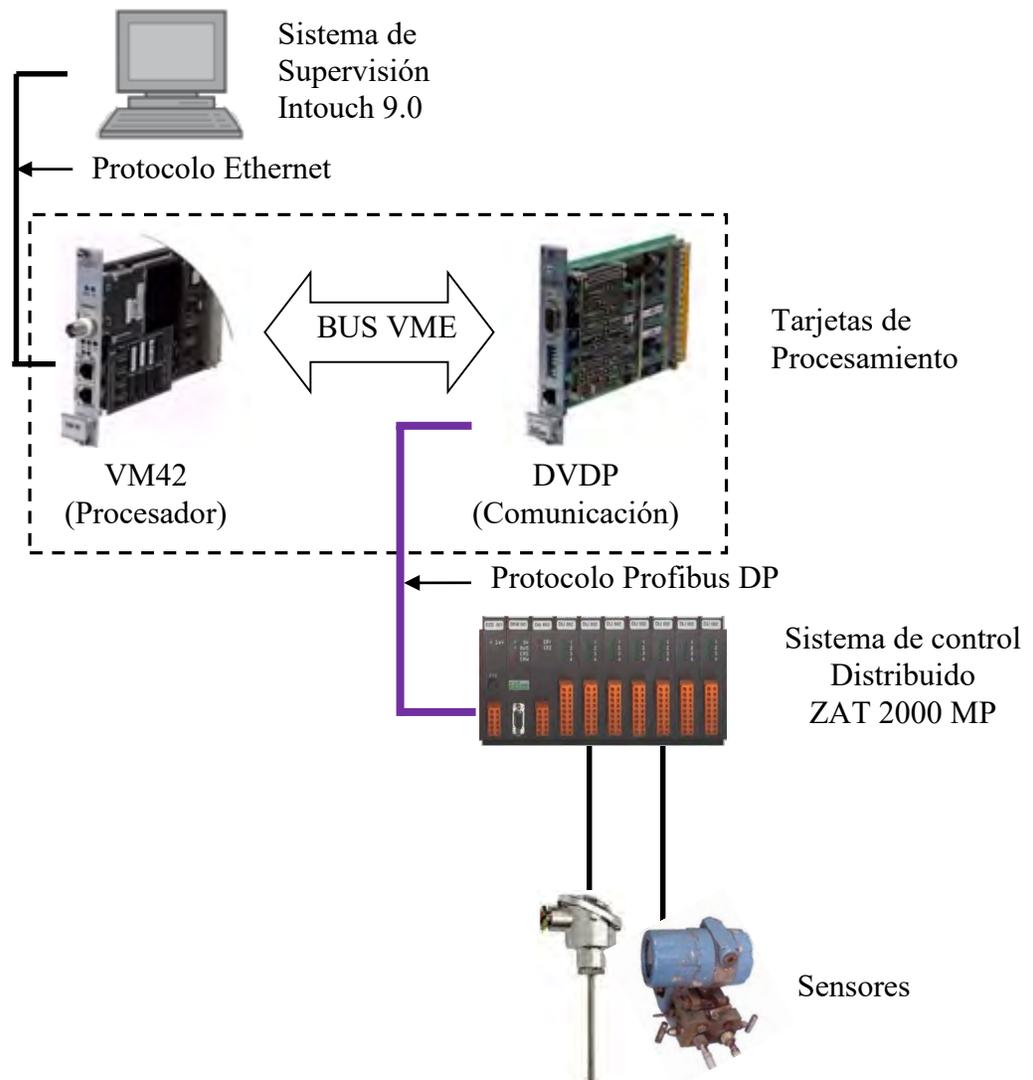


Figura F.2: Estructura del sistema de adquisición, procesamiento y supervisión

Anexo G

ANEXO G: CASO DE ESTUDIO EN LA REVISTA ENERGY, 2012

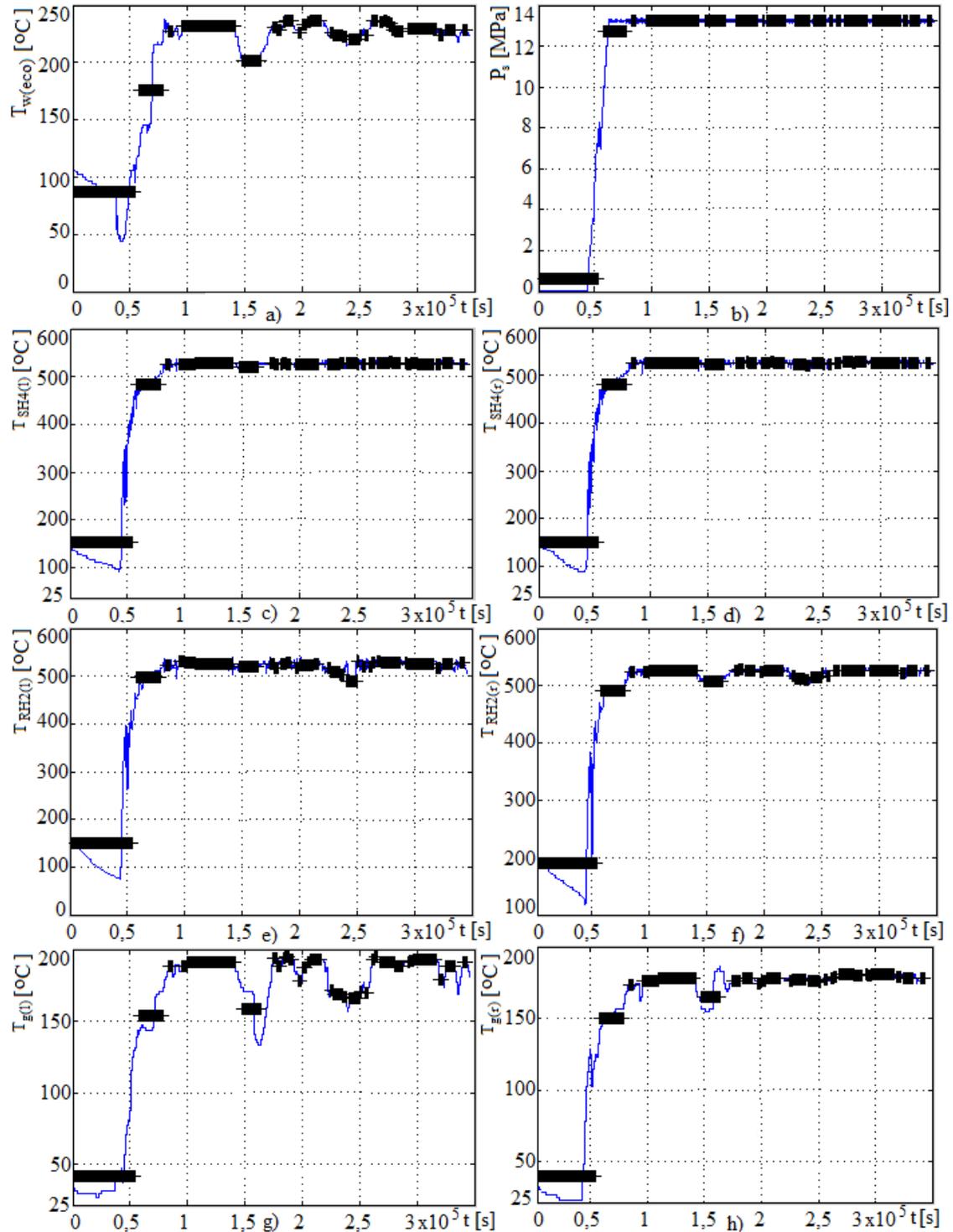


Figura G.1: Detección de EE de las variables que intervienen en el cálculo de índices de sobreconsumo

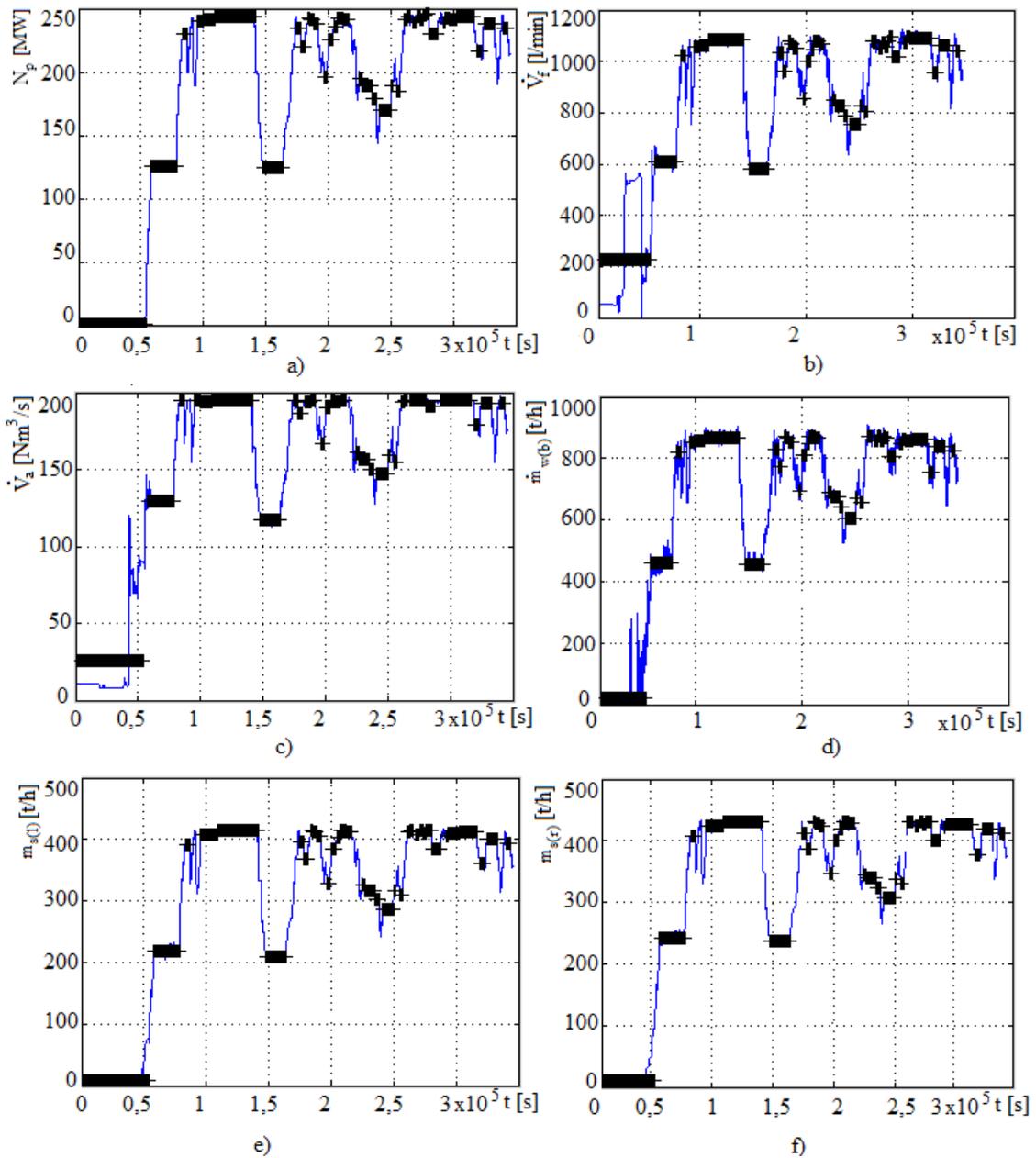


Figura G.2: Detección de EE de las variables que intervienen en las relaciones de estequiometría de evaporación

Anexo H

ANEXO H: CASO DE ESTUDIO DE LA REVISTA APPLIED ENERGY, 2013

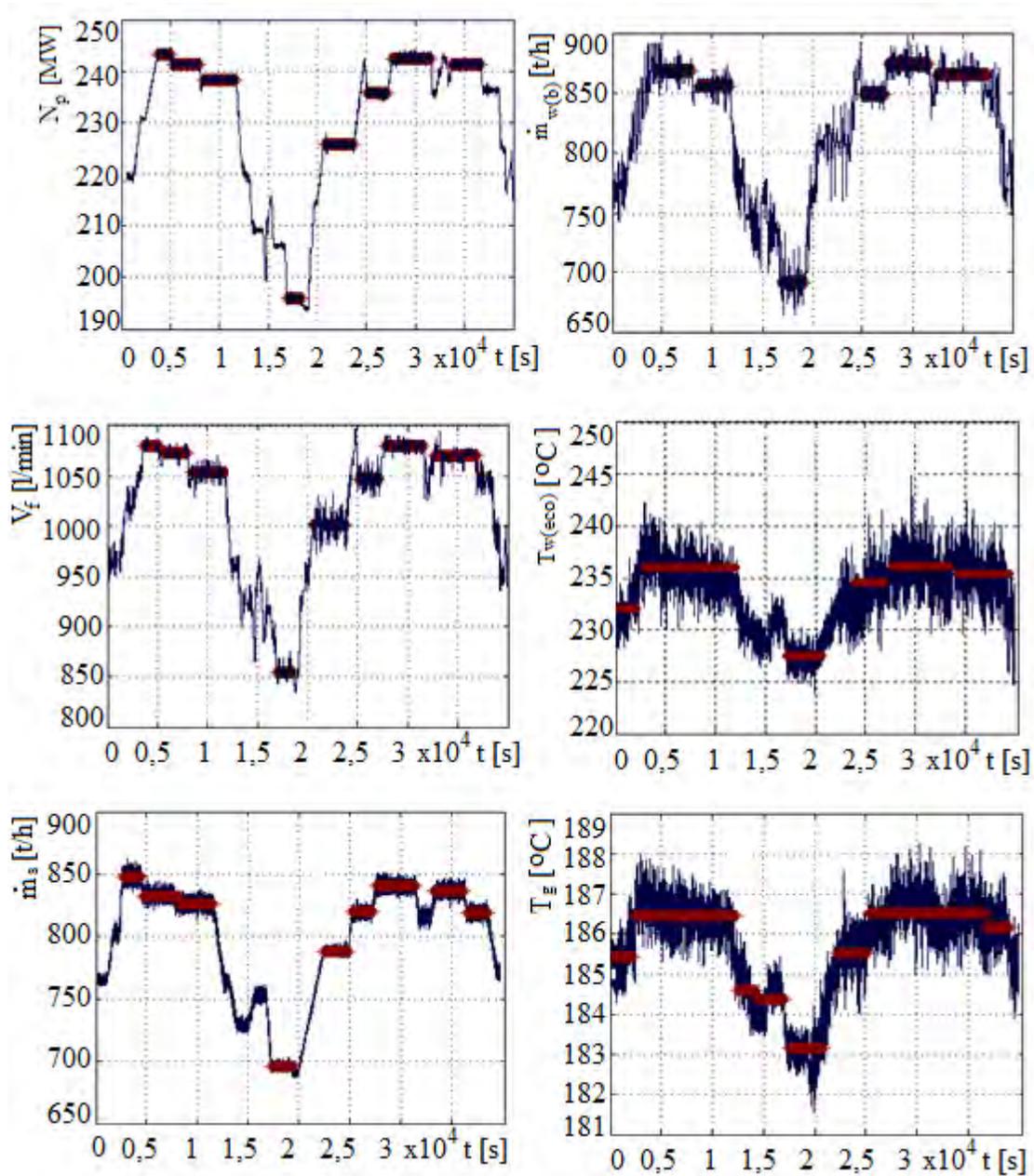


Figura H.1: Detección de Estado Estacionario para: a) N_p , b) $\dot{m}_{w(b)}$, c) \dot{V}_f , d) $T_{w(eco)}$, e) \dot{m}_s f) $T_g(l)$

Anexo I

ANEXO I: DATOS EXPERIMENTALES EN MONITORIZACIÓN DE ENSUCIAMIENTO DE SUPERFICIES

En la Tabla I.1 se indican los niveles de potencia a los cuales corresponden las pruebas de comportamiento y entre las Tablas I.2, I.3 y I.4 las medidas de las variables seleccionadas agrupadas por su rol en la transferencia de calor. Los detalles acerca de los niveles de potencia con sus fechas y tiempo se indican en las Tablas I.5.

Tabla I.1: Niveles de potencia en la determinación de medidas de la prueba de comportamiento de Septiembre del 2012

N_p	[MW]	220	180	150	250
Periodo		13:30 – 14:30	15:15 – 16:15	16:45 – 17:15	18:35 – 19:05

N_p	[MW]	220	180	150	250
\dot{V}_f	[l/min]	683,90	796,89	964,88	1090

Tabla I.2: Selección de variables atendiendo al movimiento de los gases.

N_p	[MW]	150	180	220	250
$X_{VTF(l)}$	%	43,7	45,7	71,5	95,5
$X_{VTF(r)}$	%	43,7	45,7	71,5	95,5
$X_{VRG(l)}$	%	60	30	0	0
$X_{VRG(r)}$	%	60	30	0	0
$P_{e(l)}$	[kPa]	6,3	7	8	8,8
$P_{e(r)}$	[kPa]	6,3	7	8	8,8
$P_{h(1)}$	[kPa]	1,95	2,5	3,15	3,56
$P_{h(2)}$	[kPa]	1,95	2,5	3,15	3,56
$P_{h(3)}$	[kPa]	1,95	2,5	3,15	3,56
$P_{ec(l)}$	[kPa]	0,7	0,8	1,00	1,2
$P_{ec(r)}$	[kPa]	0,7	0,8	1,00	1,2
$P_{sc(l)}$	[Pa]	0,10	0,15	0,2	0,262
$P_{sc(r)}$	[Pa]	0,10	0,15	0,2	0,262

Tabla I.3: Variables atendiendo al potencial de calor de las corrientes de gases

N_p	[MW]	150	180	220	250
$T_{gee(l)}$	[°C]	410	420	430	442
$T_{gee(r)}$	[°C]	410	420	430	442
$T_{gec(l)}$	[°C]	300	320	340	360
$T_{gec(r)}$	[°C]	300	320	340	360
$T_{g(l)}$	[°C]	151,9	154,00	157	159
$T_{g(r)}$	[°C]	151,9	154,00	157	159

Tabla I.4: Variables atendiendo al potencial de calor de las corrientes de aire

N_p	[MW]	150	180	220	250
$T_{aec(l)}$	[°C]	67	66	65,8	62,9
$T_{aec(r)}$	[°C]	67	66	65,8	62,9
$T_{asc(l)}$	[°C]	222	230	243	252
$T_{asc(r)}$	[°C]	222	230	243	252

Tabla I.5: Niveles de potencia en la determinación de medidas para la monitorización de la degradación por suciedad

Resultados: 23 de Julio del 2012

Periodo		18:13 - 19:55	20:11 - 22:05	22:34 - 23:29
N_p	[MW]	219,03	203,05	161,94

Resultados: 28 de Septiembre del 2012

Periodo		17:04- 18:59	19:27- 20:38	21:01- 23:28
N_p	[MW]	184,95	209,98	190,08

Resultados: 14 de Octubre del 2012

Periodo		18:08 - 20:15	20:44- 23:04	23:37- 01:03
N_p	[MW]	219,12	174,95	207,00

24 de Octubre del 2012

Periodo		14:28 - 17:02	17:25 - 20:47	21:08 - 22:21
N_p	[MW]	180,96	222,02	198,01