

DIAGNÓSTICO DE FALLOS DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN

García, E.*
, Morant F.*, Quiles, E.*, Blasco, R.*, Correcher, A.*

*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad
Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46071 Valencia, (España) T.
+34963879572 F. + 34963879579 E-mail : {egarciam, fmorant, equiles, rblasco
ancorsal}@isa.upv.es

Resumen

El conocimiento del tipo de fallo y su localización es un requisito indispensable para el establecimiento de tareas que implementen estrategias de recuperación y mantenimiento adecuadas, tanto en automatización de fábricas como en sistemas de control de procesos. La metodología de diagnóstico de fallos presentada en el presente artículo está basada en modelos de Sistemas de Eventos Discretos y en el concepto de diagnosticador, los cuales permiten tanto el análisis “off-line”, así como “on-line”, de la diagnosticabilidad de sistemas, referida a fallos que pueden ocurrir en los procesos. Presentamos un enfoque para modelos y los diagnosticadores asociados, basados en una descomposición modular del sistema global y aplicados al proceso de una columna de destilación, con el propósito de evitar el incremento exponencial del número de estados y de la complejidad computacional del proceso de diagnóstico.

Palabras clave: Sistemas de Eventos Discretos, diagnóstico de fallos, diagnosticabilidad, diagnosticador, modularidad.

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente artículo es mostrar las posibilidades de implementación del diagnóstico modular de fallos basado en modelos de eventos discretos, teniendo en cuenta las constantes interacciones existentes en los procesos reales entre dinámicas de tipo continuo y basadas en eventos discretos. La teoría desarrollada se aplicará sobre un extendido proceso industrial, la destilación.

La destilación es una de las operaciones básicas más utilizada en toda la industria de procesos químicos, desde las grandes plantas petroquímicas integradas hasta la industria de la alimentación. La operación consiste en separar en dos o más fracciones una

mezcla de dos o más líquidos, de forma que los componentes más volátiles se obtienen por la parte superior de la columna como productos de cabeza o destilado, mientras que los menos volátiles (las fracciones pesadas) se obtienen por la parte inferior de la columna como productos de fondos.

La dinámica de las columnas de destilación, es un problema complejo de control debido a su carácter acusadamente no lineal. Aunque su estudio se remonta a los años 50, aún en la actualidad es objeto de múltiples trabajos de investigación.

En este ejemplo se utilizará el modelo de una columna de destilación de dos productos con una alimentación única. Una descripción completa del modelo no lineal puede encontrarse en [16] y una aplicación de su control híbrido en [1] y [8].

En el apartado 2 se presentará la columna de destilación sobre la que se aplicará la metodología. En el apartado 3 se dará una explicación de la metodología aplicada. En el 4 se aplicará a la columna de destilación presentada y en el 5 se resumen las principales conclusiones derivadas del presente artículo.

2 LA COLUMNA DE DESTILACIÓN

La columna se emplea para la separación (rectificación) de mezclas de líquidos de temperatura de ebullición inferior a 115 °C en condiciones de presión barométrica de laboratorio o de plantas piloto. Está compuesta por una serie de platos en los que se pueden introducir sensores de temperatura o alimentar con mezcla ya destilada.

La columna puede trabajar tanto en régimen continuo como en discontinuo. Las características modulares del equipo permiten instalar el número necesario de platos en zonas agotadas o enriquecidas de la columna, no obstante, la construcción estándar se realiza con 5 platos.

El producto de pie y la extracción de destilado se controlan actuando sobre las válvulas desde los reguladores del ratio de reflujo. Los valores de estos ratios se pueden ajustar mediante los temporizadores de los reguladores (ver fig. 5).

2.1 DATOS TÉCNICOS

Flujo medio de la columna _____ 8 litros/hora
 Velocidad de vapor óptima _____ 0.5-0.7 m/seg.
 Eficiencia de la sección
 a) 0.76-0.88 según Hansen
 b) 0.57-0.73 según Murphreehy
 Caída de presión en la sección _____ máx. 25 mm H₂O
 Constante de tiempo de la sección _____ 10-90 seg.
 Presión máxima de vapor _____ 250 kPa
 Consumo ca _____ 8-10 kg./hora
 Presión del agua de refrigeración _____ máx 150 kPa
 Flujo ca. _____ 100 l/hora.
 Espacio ocupado _____ 800x800 m
 Altura: 10 platos _____ 3500 mm

Leyenda de la figura 1

- 1 – Matraz hervidor DN 25 con salida
- 2 – Receptor de destilación
- 3 – Cuerpo de la columna (5 platos)
- 4 – Cabeza de reflujo y condensador inverso
- 5 – Condensador final
- 6 – Terminal de unión

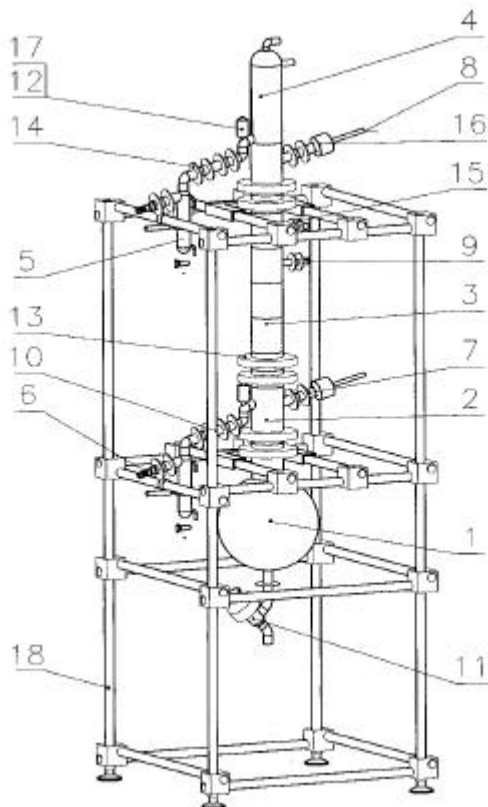


Fig. 1. Esquema de la columna de destilación

- 7 – Alojamiento para termómetro
- 8 – Termómetro 0 - 200°C
- 9 – Tapa ciega DN 15
- 10- Tubo DN 25 l=100
- 11- Válvula de descarga DN 25
- 12- Electroimán
- 13- Conector DN 100
- 14- Conector DN 25
- 15- Conector DN 15
- 16- Unión de tubería para la introducción de termómetro
- 17- Tapón
- 18- Estructura de soporte

3 DIAGNÓSTICO DE FALLOS BASADO EN MODELOS DE EVENTOS DISCRETOS

La metodología empleada para el diagnóstico de fallos está basada en Sistemas de Eventos Discretos (SED) y en el concepto de diagnosticador [21], [22], [7].

Tanto el modelo de eventos discretos como el diagnosticador, son Máquinas de Estados Finitos (MEF). El modelo del sistema es exhaustivo e incorpora, no sólo el comportamiento de funcionamiento normal de varios componentes, sino que, además, incluye estados adicionales que representan el fallo de los mismos.

La fase de modelado comienza con el modelado individual de todos los componentes que conforman el sistema. Esos modelos individuales de los componentes, incorporan tanto los estados correspondientes al funcionamiento normal como, adicionalmente, aquellos que se derivan de un comportamiento ocasionado por fallos. Evidentemente, el conjunto de todos los posibles fallos que se deben incluir en los modelos, debe ser obtenido por conocimiento empírico y criterios ingenieriles.

El modelo global del sistema, se obtiene por la aplicación conjunta del operador de composición síncrona a todos los modelos individuales del proceso, específicamente en el caso particular del "shuffle product". Cada componente individual se modela por su expresión generadora

$$G_i = (X_i, S_i, d_i, x_{0i}) \quad (1)$$

donde X_i es el espacio finito de estados, S_i es el conjunto de eventos, d_i es la función de transición, y x_{0i} es el estado inicial de G_i . Los estados en X_i y los eventos en el alfabeto S_i , reflejan el comportamiento normal y en fallo del i -ésimo componente. Algunos de los eventos en d_i son observables, esto es, su

ocurrencia puede ser observada, mientras que el resto son no observables, $S_i = S_o \dot{E} S_{no}$. Normalmente, entre los eventos observables, se incluyen las órdenes de control implementadas por el controlador y las lecturas realizadas por los transductores, mientras que en el subconjunto de los no observables, se incluyen los eventos de fallo.

3.1 EL OPERADOR DE COMPOSICIÓN SÍNCRONA

El operador de composición síncrona puede ser usado para modelar la operación conjunta de cualquier número de SED [11], [5]. En la composición síncrona se pueden definir dos casos especiales:

- a) $S_1 = S_2 = \theta$ donde la composición síncrona se reduce a otro operador con MEF llamado composición síncrona completa.
- b) $S_1 \dot{C} S_2 = \theta$, donde, en este caso, la composición síncrona es, de hecho, una composición asíncrona, ya que no existen transiciones síncronas. Este caso concreto suele recibir el nombre de “shuffle product”.

A través de operador de composición síncrona, se modela el funcionamiento conjunto de todos los generadores individuales participantes en el modelo global. Por ejemplo, para el caso de una pareja de generadores $G1$ y $G2$, el modelo global sería $G = G1 || G2$.

El SED resultante estaría determinado por las acciones concurrentes de $G1$ y $G2$ bajo la suposición que dichas acciones son asíncronas e independientes. Los estados de G son pares ordenados (X, Y) donde X es un estado de $G1$ e Y es un estado de $G2$, y las transiciones de G También son de la forma $(X, Y) \rightarrow (X', Y)$ donde $X \rightarrow X'$ es una transición en $G1$, o de la forma $(X, Y) \rightarrow (X, Y')$ donde $Y \rightarrow Y'$ es una transición en $G2$.

3.2 EL CONCEPTO DE DIAGNOSTICADOR

El diagnosticador Gd es una MEF, obtenida del modelo de eventos discretos del sistema. Cada estado del diagnosticador q_d tiene la forma

$$q_d = \{(x_1, l_1), \dots, (x_n, l_n)\} \quad (2)$$

Tiene información que indica el conjunto de x estados en los que el sistema se puede encontrar. En realidad, cada estado del diagnosticador q_d está formado incluyendo todos los posibles estados x que pueden ser alcanzados como consecuencia de la ocurrencia de cierto evento observable s . Esos estados q_d , están formados por parejas $\{x, l\}$ donde l puede ser bien una etiqueta de funcionamiento

normal N , bien una etiqueta ambigua A , o bien una etiqueta de fallo F . El objetivo consiste en obtener que el diagnosticador sea capaz de diagnosticar, de cierta manera, la ocurrencia de algún tipo de fallo, con un retardo finito, como consecuencia de un evento de fallo F_i .

El diagnosticador Gd puede ser entendido como un observador extendido en el que se añaden a cada estado estimado, una etiqueta de las comentadas anteriormente. El algoritmo que constituye el diagnosticador se ejecuta en el nivel de supervisión (fig. 2). Recibe información “on-line” del controlador local en nivel de abajo y desempeña las tareas de diagnóstico. No obstante, en una etapa previa de diseño, se ha empleado “off-line” para establecer las condiciones de diagnosticabilidad del modelo. Como las condiciones de diagnosticabilidad del sistema pueden ser alcanzadas incorporando nuevos sensores, se puede empezar analizando las condiciones de diagnosticabilidad del sistema “off-line”, inicialmente, con aquellos sensores estrictamente necesarios para llevar a cabo la monitorización y el control del proceso. El hecho de que un modelo no sea diagnosticable, significa que existirá cierta incertidumbre con respecto a que el sistema ha fallado o no, algo que impide conseguir la afirmación, en cierto modo, que dicho fallo ha ocurrido. En caso de que el sistema no sea diagnosticable, se debe reiniciar la fase de modelado, introduciendo los instrumentos de detección necesarios que permitan cambiar las condiciones de diagnosticabilidad. Por el contrario, para un correcto funcionamiento, el diagnosticador debe ser capaz de establecer que una fallo del tipo F_i , se ha producido.

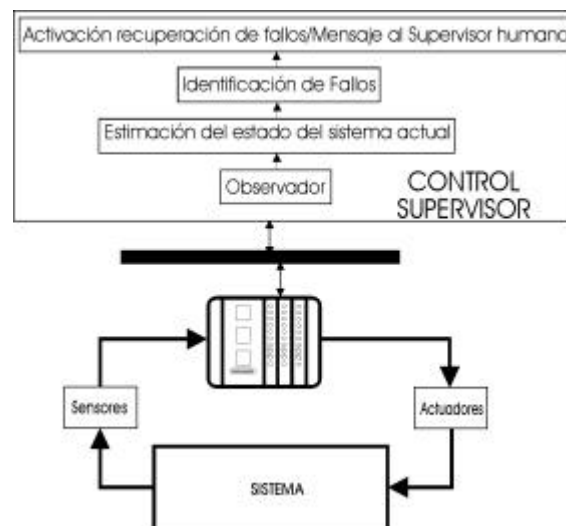


Fig. 2. Arquitectura del sistema y proceso de diagnóstico.

Específicamente, se dice que el sistema es diagnosticable, si el correspondiente diagnosticador entra en un bucle de estados Fi -ciertos donde todos los estados q_i del modelo del diagnosticador contienen una sola etiqueta aislada [21]. Otra condición de diagnosticabilidad más relajada definida I-diagnosticabilidad, se da cuando en un sistema es posible diagnosticar fallos, no siempre, pero sí cuando los eventos de fallo van seguidos por un evento indicador [22].

3.3 EL DISEÑO MODULAR

La metodología de diagnóstico desarrollada en [19] y [20] está basada en modelos de eventos discretos y, dado que cualquier sistema puede ser modelado como un SED desde un nivel de abstracción fijado, resulta aplicable a un gran número de sistemas industriales. No obstante, a pesar de su notable interés, presenta el inconveniente de los sistemas parcialmente observados, en el sentido del inevitable crecimiento exponencial de estados que se produce a medida que se incorporan nuevos modelos de dispositivos que forman parte del sistema, o se añaden nuevos supuestos de fallo. Desde nuestro punto de vista, los sistemas originalmente presentados, tenían como principal característica modelos resultantes de cierta complejidad, en sentido de legibilidad, aunque los sistemas a los que representaban eran relativamente simples. Por otra parte, otra característica común era su funcionalidad invariable en situaciones normales, esto es, las operaciones del sistema una vez comenzaban, siempre era la misma.

En el trabajo que se presenta en este artículo, además de otros objetivos, se pretende incorporar dentro de la nueva metodología, unas características diferentes de aquellas empleadas inicialmente, en el sentido de mayor variabilidad funcional y de un número de componentes relativamente elevado. La complejidad de los sistemas productivos también puede ser considerada teniendo en cuenta el número de dispositivos interrelacionados en ellos. En este sentido, la aplicabilidad de la metodología original para modelado y diagnóstico de fallos basada en sistemas de eventos discretos puede ser seriamente restrictiva.

Nuestro objetivo, para evitar el crecimiento exponencial del número de estados, es presentar una concepción modular del sistema, dividiéndolo en diversos subprocesos siguiendo dos criterios principalmente:

a) Los subprocesos estarán formados teniendo en cuenta la interrelación funcional de los dispositivos que lo forman.

b) Considerando la dimensión adecuada de los modelos, con respecto al número de estados necesarios para ser capaz de llevar a cabo su análisis y tratamiento de una forma razonable.

Supongamos, pues, que descomponemos el modelo global en n subsistemas, siguiendo las reglas indicadas, de la siguiente manera:

$$S = S_1 \cup \dots \cup S_n \quad (6)$$

de tal forma que el generador del modelo global se pueda descomponer en subgeneradores operando de forma concurrente:

$$G = G_1 // \dots // G_n \quad (7)$$

Posteriormente, cada subsistema del modelo de eventos discreto y su correspondiente diagnosticador serán desarrollados. Los diferentes diagnosticadores actuarán de forma concurrente, cada uno realizando funciones de detección de sí mismos y de los fallos correspondientes de los subsistemas.

Es fácil demostrar que el número de estados se reduce de forma considerable con esta descomposición, ya que:

$$/ \prod_i X_i / \gg / X_{S1} \cup \dots \cup X_{Sn} / \quad (8)$$

Para garantizar la coherencia en el funcionamiento global del sistema, se perfila un controlador global absolutamente sincronizado, como el producto completamente sincronizado de los diferentes controladores modulares específicos de cada subsistema. De este modo:

$$L_m(G_{c1} \times \dots \times G_{cn}) = L_m(G_{c1} \cap \dots \cap G_{cn}) \quad (9)$$

Si S_c es el conjunto de eventos $\alpha, \beta, \chi, \dots$ del controlador global G_c , cada evento compuesto será:

$$a = a_1 \wedge \dots \wedge a_n \quad (10)$$

A veces, por razones de funcionalidad del proceso, no se puede implementar un controlador global completamente sincronizado. Esto no afecta a la validez del proceso de descomposición modular propuesto. La imposibilidad de sincronizar la trazas generadas por controladores modulares diferentes tendrá, como consecuencia, la necesidad de construir controladores parcialmente sincronizados o no sincronizados, cosa que significa que su implementación práctica requerirá de un número mayor de estados que el del modelo totalmente sincronizado.

Por otro lado, como un diagnosticador global necesita entrar en un bucle de estados Fi-ciertos para

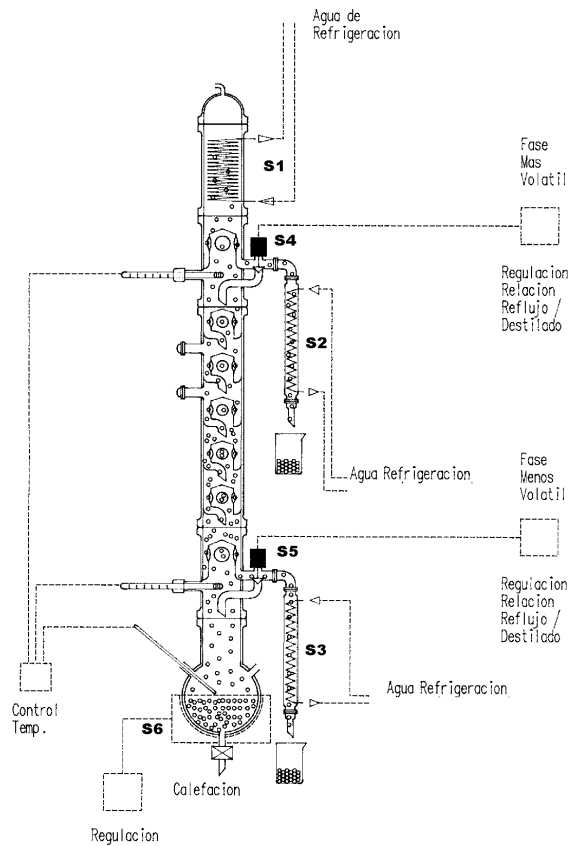


Fig. 3 Esquema global de la columna.

llevar a cabo la detección de algún tipo de fallo y, en este caso, por definición sólo se puede encontrar un tipo de fallo en cada bucle Fi-cierto, esto implica que, en cada operación de diagnóstico sólo se puede detectar un tipo de fallo.

En la aproximación modular, por el contrario, es posible la detección de un tipo de fallo en cada uno de los diagnosticadores modulares que pueden operar concurrentemente. Esto significa, en general, poseer un nivel de detección mayor y, en particular, algo que puede ser necesario en aquellos sistemas donde la ocurrencia de un fallo puede provocar una cadena aparente de fallos en diferentes subsistemas. En este caso, es conveniente distinguir los fallos ocurridos, de los errores de funcionamiento provocados en los subsistemas, derivados de los fallos ocurridos en otros subsistemas.

4 APLICACIÓN A LA COLUMNA DE DESTILACIÓN

Bajo el punto de vista del diagnóstico de fallos, se utilizará el modelo de columna representado en la figura 3 y, en un enfoque modular, se descompondrá

el sistema en diversos subsistemas que denominaremos S1, S2, S3, S4, S5 y S6.

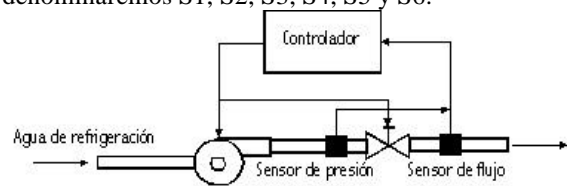


Fig. 4. Detalle de los subsistemas S1, S2 y S3.

4.1 SUBSISTEMAS DE CONDENSACIÓN

S1: Constituye el sistema de condensación de cabeza de la columna. Básicamente, al igual que S2 y S3, está constituido por una motobomba, una válvula de admisión y sensores de caudal, presión y un detector de posición de válvula. Los componentes son idénticos a los mostrados en la fig. 4.

S2: Constituye el sistema de condensación del producto destilado.

S3: Constituye el sistema de condensación del producto de fondo. En dicho fondo de la columna, un producto de fondos de caudal "B" (moles/t) y composición x_B (moles de A/moles totales), se obtiene como desecho o como producto dependiendo de las condiciones de alimentación y del propósito de la destilación. Parte del producto de fondos es realimentado a la columna, de forma que la mezcla de líquido en el fondo de la columna de masa "MB" moles permanezca constante. Los modelos de composición y los diagnosticadores resultantes pueden ser estudiados en [7].

4.2 SUBSISTEMAS DE REGULACIÓN DEL REFLUJO

S4: Constituye el sistema de regulación de la relación de reflujo. El objeto del reflujo es mantener los platos llenos de líquido y mejorar el rendimiento de la operación. Este sistema actuará durante la fase de destilado y su control dependerá del controlador del sistema híbrido diseñado.

La política de control depende de los siguientes criterios. El control de reflujo se lleva a cabo por una válvula cuyo mecanismo de apertura/cierre se acciona mediante una bobina electromagnética. El solenoide recibe impulsos intermitentes de corriente controlados mediante una temporización. Ello provoca asimismo la apertura o cierre correspondiente de la válvula. El dispositivo de obturación de la válvula es una vaina de cristal en cuyo interior se encuentra un núcleo ferromagnético. Este último dispositivo es susceptible de provocar fallos debidos a efectos de rotura por fatiga del material. En condiciones normales, una orden de

control de apertura de válvula de reflujo debería ir acompañada de la detección de presión ejercida por

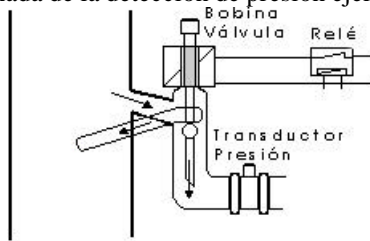


Fig. 5 El sistema de reflujo.

el vapor a la salida de dicha válvula. Un fallo por rotura del vástago solidario con el núcleo ferromagnético, ofrecería una orden de control de apertura, sin presión a la salida de válvula (CON, NP). Por ello, la detección del fallo se realizará mediante el auxilio de un sensor de presión. En el subsistema se contempla la actuación de un relé de conmutación de la válvula de reflujo, al que se le supone la posibilidad de fallo. Como sensor adicional del relé, se ha supuesto la información obtenida de una de los contactos auxiliares de señalización (AUX_ON, AUX_OFF).

S5: Constituye el sistema de regulación de la relación de reflujo en el producto de fondo. Lo comentado en el párrafo anterior, respecto del diagnóstico de fallos tiene plena validez para el subsistema S5. Los modelos de dispositivo correspondientes a S4 y S5 se muestran en la fig. 6, donde se supone un estado de fallo en “atascamiento en cerrado” (AC) para la válvula. En lo concerniente al controlador, se le supone dos estados de apertura y cierre del vástago, independientemente de la estrategia de control en la temporización que se lleve a cabo. Se utiliza un sensor de presión con los estados PP (presión positiva) y NP (no presión) con objeto de la detección del fallo.

El modelo de composición del subsistema se muestra en la figura 7, el modelo simplificado en la 8, y el diagnosticador resultante en la fig. 9.

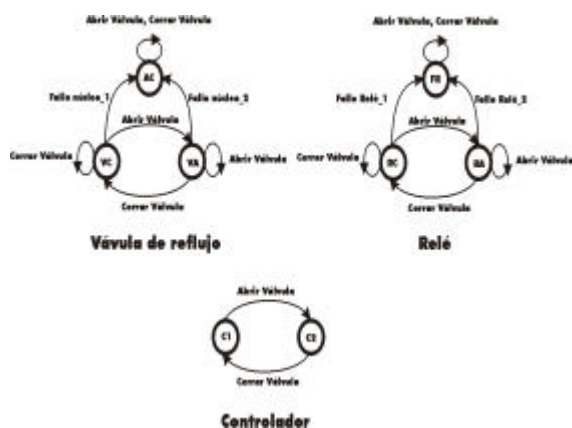


Fig. 6 Modelos de los elementos de la fig. 5.

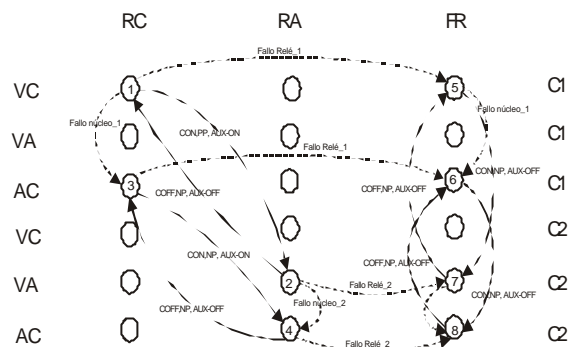


Fig. 7 Modelo de composición de S4.

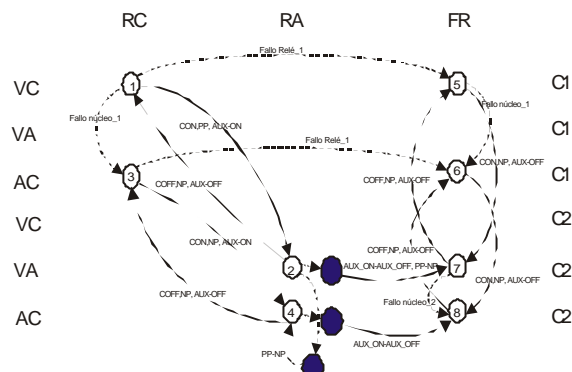


Fig. 8 Modelo simplificado de S4.

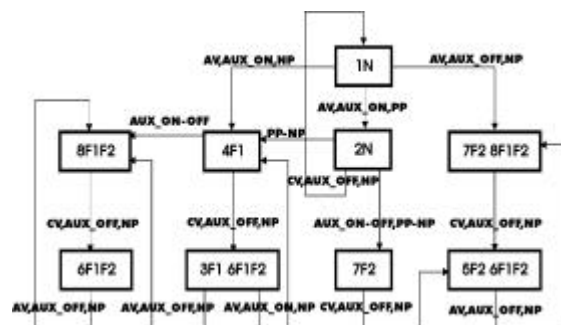


Fig. 9 Diagnosticador de S4.

4.3 SUBSISTEMA DE REGULACIÓN DE TEMPERATURA

S6: Está constituido por la “manta de calefacción” que se encarga de suministrar la energía calorífica a la mezcla. Básicamente el subsistema está formado por una resistencia de caldeo, el controlador, y el sensor de temperatura.

Los hervidores consisten, normalmente, en matraces esféricos, recomendándose calefacción eléctrica con regulador. El tamaño y potencia deben determinarse de acuerdo con la capacidad de la columna y teniendo en cuenta que debe ser posible el sobrecalentamiento necesario para la inundación previa.

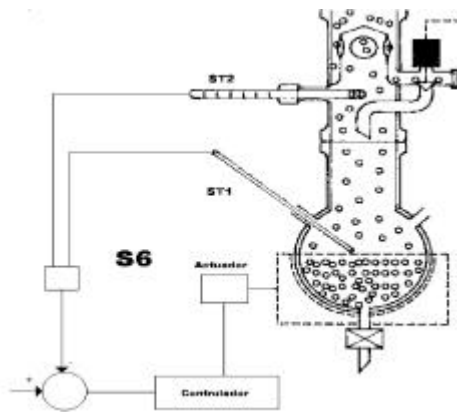


Fig. 10 Detalle del subconjunto S6.

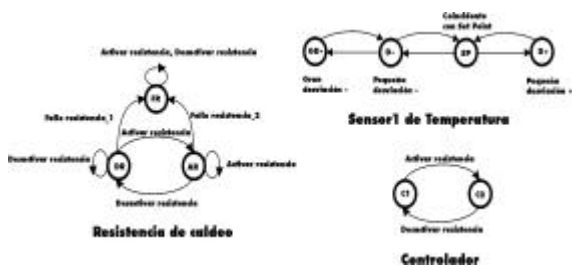


Fig. 11 Modelos del subconjunto S6.

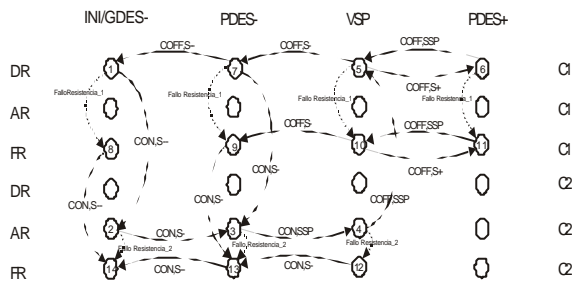


Fig. 12 Modelo de supuesto de fallo de la resistencia de calefacción.

La regularidad en la ebullición tiene mucha importancia para mantener las condiciones de equilibrio de la columna. Para ello es conveniente proteger la parte descubierta del hervidor, con el fin de que no reciba corrientes de aire, evitando asimismo "saltos" en la ebullición.

En el modelo en cuestión, se ha supuesto la posibilidad de un estado de fallo en la resistencia de calefacción por falta de suministro de energía calorífica. Igualmente se ha constituido un modelo discreto de la carga, con la división arbitraria del comportamiento en cuatro estados entorno a un punto de funcionamiento establecido por la temperatura asignada a la consigna. Estos puntos, se establecen en una temperatura inicial, en la que se

supone una gran desviación de la consigna (s--), el propio valor de consigna (ssp), y las posibles desviaciones por exceso (s+) y por defecto (s-). Por último un modelo de controlador, que bajo el punto de vista discreto posee los estados ON, OFF, independientemente de la estrategia de control. Se utiliza como elemento de detección, el sensor de temperatura ST1 de la figura 10. Los modelos de eventos discretos de los dispositivos se muestran en la fig. 11, su correspondiente modelo de composición en la figura 12 y su diagnosticador en la figura 13.

Los subsistemas S1, S2 y S3 están constituidos cada uno de ellos por una bomba, una válvula de admisión y los dispositivos de sensorización, presión, caudal y de apertura de válvula.

Mediante la descomposición modular, los estados de partida que se obtendrían serán la suma de los resultantes de cada subsistema:

- S1 = 4·4·4 = 64
- S2 = 4·4·4 = 64
- S3 = 4·4·4 = 64
- S4 = 3·3·2 = 18
- S5 = 3·3·2 = 18
- S6 = 4·3·2 = 24

Resultando un total de 252 estados.

Teniendo en cuenta los objetivos de funcionamiento para el diagnóstico de fallos, es posible realizar un controlador que contemple los macroestados que puede atravesar la columna en las fases de parada, preparación para el funcionamiento, funcionamiento y preparación para la parada.

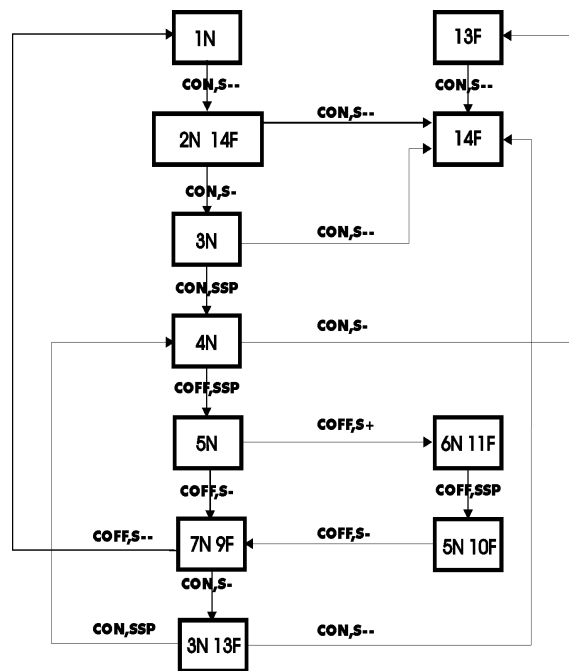


Fig. 13 Diagnosticador resultante del modelo de la figura 12.

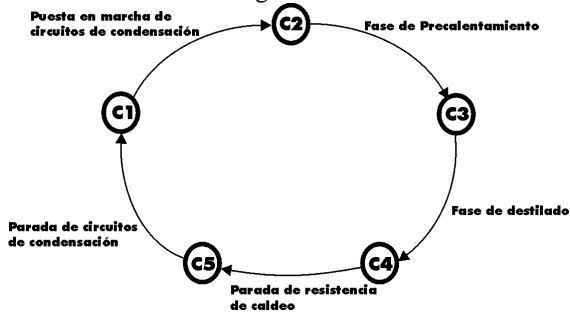


Fig. 14 Macroestados del sistema.

El diagrama de estados correspondientes a las cinco fases se muestra en la fig. 14. En el estado C3, se contemplaría el funcionamiento concurrente del controlador del sistema.

4.4 RECONFIGURACIONES DEL SISTEMA DE CONTROL.

Volviendo al ejemplo de la columna de destilación, en el caso del subsistema S6, se observa la existencia de un sensor ST1 para el control específico de la temperatura del hervidor. No obstante en la columna, existen otros dos que se utilizan para el conocimiento de la temperatura en la salida del reflujo y también para la comprobación del equilibrio térmico de la misma. Estos son: el de fondos (ST2) y el de destilado (ST3). En equilibrio térmico, todos los sensores de temperatura deben registrar el mismo valor, luego en caso de fallo del primero, podría establecerse una estrategia de sustitución de ST1 por ST2 sin excesiva dificultad. Por tanto, se puede considerar el sensor de temperatura ST2, como sensor auxiliar, (sin necesidad de utilizar sensores redundantes) en un módulo de diagnóstico donde el objeto fundamental es detectar el suceso de un fallo del sensor específico del control de temperatura ST1. Por lo tanto para este último supuesto, se considerará el subsistema de diagnóstico formado por los modelos de dispositivo mostrados en la figura 15.

En este se considera un modelo de carga de 5 estados, un modelo de controlador de dos estados, un sensor específico de control de temperatura con 6 estados (ST1), correspondiendo 5 de ellos a una división arbitraria del rango de temperaturas, dos para sus valores extremos, tres para los valores considerados entorno a un punto de funcionamiento, y uno para el supuesto de un estado de fallo, y el sensor de temperatura del reflujo de fondos considerado como sensor auxiliar en el contexto del diagnóstico de fallos. La capacidad de diagnóstico establecida en ese supuesto, permitiría detectar el fallo del sensor de temperatura principal antes de

salir en exceso del rango de funcionamiento usual, evitando, así, el que se realicen aportaciones de

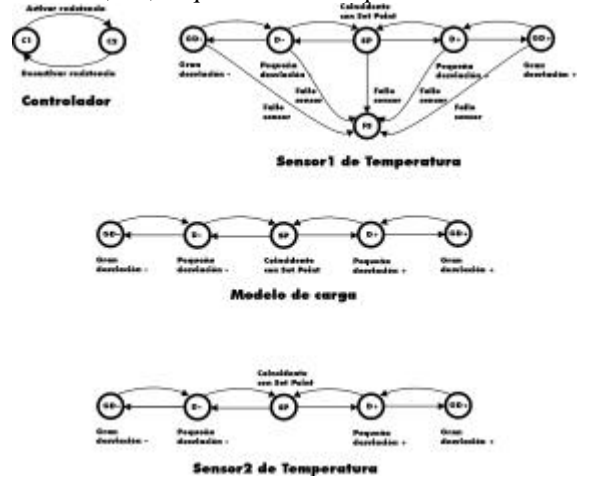
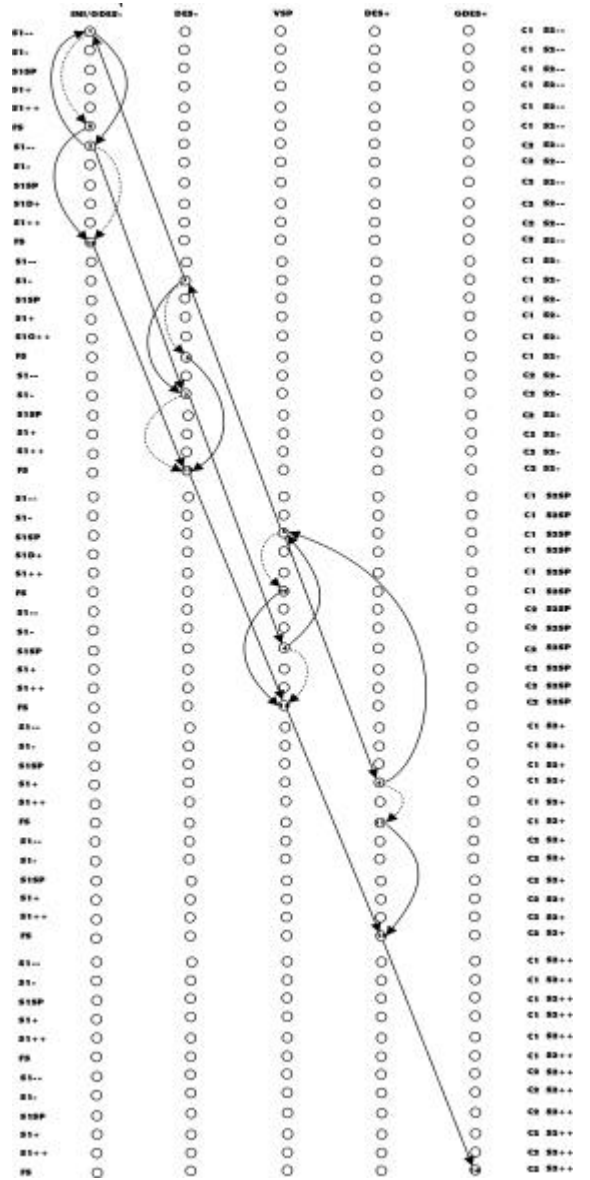


Fig. 15 Modelo de los elementos en el subsistema S6.



pueden ser caracterizados por su funcionamiento normal y en fallo.

Referencias

- [1] P.J. Antsaklis, M.D. Lemmon, and J. A. Stiver. "Hybrid System Modeling and Event Identification" Tech.Report:Depart. of Electrical Engineering,University of Notre Dame, Indiana. January,1993.
- [2] A. Arnold, "MEC: A system for constructing and analyzing transition systems," in *Automatic Verification of Finite State Systems-Lecture Notes in Computer Science*,vol. 407, J. Sifakis, Ed. New York: Springer-Verlag, 1989, pp. 117-132.
- [3] S. Bavishi and E. Chong, "Automated fault diagnosis using a discrete event systems framework," in *Proc. 9th IEEE Int. SYMP. Intell Contr.*, 1994, pp. 213-218.
- [4] R. Cicslak, C. Desclaux, A. Fawaz, and P. Varaiya, "Supervisory control of discrete event processes with partial observations," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 33, no. 3, pp. 249260, Mar. 1988.
- [5] E.García, F. Morant, "Aplicaciones de los modelos de eventos discretos obtenidos mediante el operador de composición sincrónica" XIX Jornadas de Automática, Madrid., pp. 199-204, 1998.
- [6] E.García, F. Morant, "Diagnóstico de Fallos basado en modelos de eventos discretos" XIX Jornadas de Automática, Madrid., pp. 205-210, 1998.
- [7] E.García, F. Morant, "Diagnóstico de Fallos modular y control supervisor para un proceso químico de mezclas" XX Jornadas de Automática, Salamanca., pp. 267-272, 1999.
- [8] E. Garcia. Descomposición modular de diagnosticadores de fallos basados en modelos de eventos discretos. Tesis doctoral. Junio 2000.
- [9] L. Holloway and S. Chand, "Time templates for discrete-event fault monitoring in manufacturing systems," in *Proc. 1994 Amer. Contr. Conf.*, pp. 701-706, 1994.
- [10] J. E. Hopcroft and J. D. Ullman, *Introduction to Automata Theory, Languages and Computation*. Reading, MA: AddisonWesley, 1979.
- [11] S. Lafortune and E. Chen, "A relacional algebraic approach to the representation and analysis of discrete-event systems," in *Proc. 1991 Amer. Contr. Conf.*, Boston, MA, pp. 2893-2898.
- [12] S. Lafortune, "Modelling and analysis of transaction execution in database systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 33, no. 5, pp. 439-447, May 1988.
- [13] F. Lin, "Diagnosability of discrete-event systems and its applications,"*J.DEDS*, vol. 4, no. 2, pp. 197-212, 1994.
- [14] F Lin and W. M. Wonham, "Decentralized control and coordination of discrete-event systems," in *Proc. 27th IEEE Conf Decision and Control (Austin, TX)*, pp. 1125-1130, Dec. 1988
- [15] F Lin and W. M. Wonham, "Decentralized supervisory control of discrete-event systems," *Inform. Sci.*, vol. 44, pp. 199-224, 1988.
- [16] M. Morari and E. Zafiriou. *Robust Process Control*. Prentice Hall, 1989.
- [17] C. M. Ozveren and A. S. Willsky, "Observability of discrete-event dynamic systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 35, pp. 797-806, 1990.
- [18] M. Perez, R. Font. "Dinamica y Control de Columnas de Destilacion con Matlab". II Congreso de Matlab, Madrid, 1996. Departamento de Informatica y Automatica. UNED pp 415-422.
- [19] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "Supervisory control of a class of discrete-event processes," *SIAM J. Contr. Optimization*, vol. 25, no. 1, pp. 206-230, jan. 1987.
- [20] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "Modular feedback logic for discrete event systems," *SIAM J. Contr. Optimization*, vol. 25, no. 5, pp. 1202-1218, May 1987.
- [21] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis, "Diagnosability of discrete-event systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 40, no. 9, pp. 1555-1575, 1995.
- [22] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis, "Failure diagnosis using discrete-event models," *IEEE Trans. On Contr. Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 105-124, March1996.
- [23] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis, "Failure diagnosis using discrete-event models," Dep. EECS, Univ. Michigan, Tech. Rep. CGR 94-3, 1994.
- [24] K. Sinnamohideen, "Discrete-event based diagnostic supervisory control system," presented at the AICHE Annu. Mtg., Los Angeles, CA, Nov. 17-22, 1991.