

## Dependability assessment by simulation of a dynamic system with different modes of ageing

Gabriel Antonio Pérez Castañeda<sup>1,2</sup>, Jean-François Aubry<sup>1</sup>, Nicolae Brinzei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CRAN CNRS UMR 7039, Nancy – Université, INPL – ENSEM. 2, avenue de la forêt de Haye, 54516 Vandoeuvre-lès-Nancy. +33(0)3 83 59 59 59, +33(0)3 83 59 59 55.

perezc76@ensem.inpl-nancy.fr; jean-francois.aubry@isi.u-nancy.fr;  
nicolae.brinzei@ensem.inpl-nancy.fr.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Tehuacán. Libramiento Instituto Tecnológico s/n, 75770, Tehuacán, Puebla, México. +52 238 382 24 48, +52 238 382 39 51.

### Abstract

The concept of dynamic reliability aims to take into account the interactions between the dynamic and deterministic functional behavior of the system and the stochastic dysfunctional behavior of its components. Some problems must be taken into account in the dynamic reliability: (i) the dynamic interactions between the physical parameters (usually represented by the continuous variables) and the nominal or dysfunctional behavior of the components (usually represented by the occurrence of events), (ii) the instant and the order of the events occurrence, including failures, (iii) the modes of ageing of the multiple components according to the system state. The traditional tools of the reliability can not be applied effectively to solve these problems because they assume an invariant structure in time for the system. This paper presents the reliability assessment of a dynamic system in which there are reconfigurations involving various modes of ageing for some components (changing laws, changing the parameters of laws etc.). The performance indices of the system, such as the reliability, the availability and the maintainability, are determined by Monte Carlo simulation.

**Key words:** Dynamic reliability, ageing, hybrid stochastic automaton, Monte Carlo simulation.

## Evaluación de la fiabilidad de un sistema dinámico con diferentes modos de envejecimiento

### Resumen

La fiabilidad dinámica tiene por objeto tomar en cuenta las interacciones entre el comportamiento funcional dinámico y determinista de un sistema y el comportamiento estocástico de sus componentes. Algunos de los problemas que debe tomar en cuenta la fiabilidad dinámica son: (i) las interacciones dinámicas entre los parámetros físicos (representados generalmente por variables continuas) y el comportamiento nominal o disfuncional de los componentes (representado generalmente por la ocurrencia de eventos); (ii) el instante y el orden de ocurrencia de los eventos, notablemente las fallas; (iii) los modos de envejecimiento múltiple de los componentes según el estado del sistema. Las herramientas tradicionales de la fiabilidad previsional no pueden ser aplicadas eficazmente para resolver estos problemas porque ellas suponen una estructura invariante en el tiempo para el sistema. En este artículo se presenta la evaluación de la fiabilidad de un sistema dinámico en el cual existen re-configuraciones implicando diferentes modos de envejecimientos para ciertos componentes (cambios de leyes, cambio de los parámetros de las leyes, etc.). Los índices característicos del sistema, tales como la fiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, son determinados a través de una simulación de Monte Carlo.

**Palabras clave:** Fiabilidad dinámica, envejecimiento, autómatas estocásticos híbridos, simulación de Monte Carlo.

## Introducción

Para evaluar la fiabilidad de un sistema dinámico híbrido, es necesario tomar en cuenta los problemas que plantea la fiabilidad dinámica. En [1] se ha presentado un estado del arte sobre las diferentes aproximaciones que han sido desarrolladas para solucionar esta problemática. Dada la complejidad y los límites matemáticos para evaluar de manera analítica la fiabilidad de un sistema dinámico híbrido, la fiabilidad dinámica es sólo frecuentemente accesible por simulación. Por esta razón, se ha inventado y definido el nuevo concepto de autómata estocástico híbrido (AEH) el cual permite englobar los problemas relativos a la fiabilidad dinámica e integrarlos en el ambiente de simulación [1, 2]. El AEH ha sido implementado en el ambiente de simulación Scicos de Scilab. En esta contribución, el objetivo es presentar la evaluación de la fiabilidad de un sistema dinámico en el cual existen re-configuraciones implicando diferentes modos de envejecimiento para diferentes componentes.

## Envejecimiento de los componentes

La ley que representa la duración de vida de un componente, expresada por el índice de falla  $\lambda(t)$ , evoluciona en el tiempo siguiendo tres periodos. El primero, llamado de "juventud" o "mortalidad infantil" se caracteriza por un  $\lambda(t)$  relativamente importante, pero en decrecimiento. El segundo, corresponde a un periodo de "vida útil" en el cual  $\lambda(t)$  es constante. En este periodo el equipamiento está en su fase de maduración. El tercero, es un periodo de "envejecimiento" correspondiendo a un  $\lambda(t)$  que aumenta rápidamente en función del tiempo. Estos tres periodos o fases son comúnmente representados por la curva de la bañera [3].

La mayor parte de las técnicas utilizadas en la Seguridad de Funcionamiento (SdF) son válidas para la zona útil. La ley exponencial es la ley más utilizada debido a que permite obtener resultados analíticos sencillos y fáciles de interpretar y corresponde a un  $\lambda(t)$  constante. La ley que representa las tres fases de la duración de vida de un material es la ley de Weibull. Esta ley tiene tres parámetros:  $\gamma$  es el parámetro de localización

y corresponde a una simple traslación sobre la escala del tiempo.  $\eta$  es el parámetro de escala relacionado al tiempo de buen funcionamiento y  $\beta$  es el parámetro de forma. Este parámetro es el más importante de la ley de Weibull ya que interviene directamente sobre la variación del porcentaje de falla y permite de esta manera modelizar alternativamente las tres fases de la curva de la bañera. Un valor de  $\beta < 1$ , corresponde al periodo de juventud; para  $\beta = 1$  se tiene el periodo de madurez, en donde encontramos la ley exponencial; y  $\beta > 1$  corresponde al periodo de vejez o de desgaste de los materiales. Así pues, la ley de repartición  $F(t)$  y el índice de falla  $\lambda(t)$  correspondientes a la ley de Weibull están dadas por:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta(t - \eta)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (2)$$

## Métodos

En la literatura se encuentran diferentes formas de abordar el fenómeno del envejecimiento de los componentes. Se tienen aproximaciones basadas en la experiencia y en el conocimiento del fenómeno. Grellier, Oddi y Simon [4] presentan acciones para dominar el envejecimiento y la obsolescencia de materiales electrónicos. También existen aproximaciones que utilizan la ley de Weibull con el fin de dar una estimación del envejecimiento de uno o varios componentes. En [5] el objetivo es la construcción de un modelo que utiliza dos informaciones (distancia y tiempo) transformadas en una sola variable permitiendo modelizar de la mejor manera la sollicitación sufrida por un componente. La aproximación presentada en [6] permite distinguir entre una falla debida a la mala concepción de una pieza de un equipo o si la falla es debida al envejecimiento del componente en cuestión. El indicador utilizado para vigilar el comportamiento de un componente es el índice de falla. Así, el envejecimiento de un componente está representado por la acumulación de sus fallas. Por otro lado, Soro, Nourelfath y Ait-Kadi [7] proponen una estrategia de mejoramiento del rendimiento de un sistema multi-es-

tados. El método considera que el estado del sistema se degrada con el uso. Los niveles de degradación no pueden exceder un cierto umbral límite que puede ser considerado como una falla completa. El sistema puede fallar de manera aleatoria en cualquier estado operacional y ser objeto de una reparación mínima. Esta acción de reparación lleva al sistema a su estado operacional precedente sin afectar su índice de falla. Para evaluar las estrategias de mantenimiento de un sistema bajo aspectos económicos, Borgonovo, Marseguerra y Zio [8] proponen tomar en cuenta la duración de vida pasada de un componente así como la previsión de su duración de vida restante. Con el fin de caracterizar el envejecimiento, se tienen dos parámetros importantes: el momento en el cual inicia el envejecimiento y la rapidez con la cual aumenta el índice de falla.

Para ilustrar el método que se propone, se ha considerado el caso de un sistema dinámico híbrido constituido de un horno y de su sistema de control de temperatura (Figura 1). El sistema está constituido por dos lazos de regulación. El primero, contiene un controlador Proporcional-Integral (PI) el cual tiene como función controlar la temperatura del horno en términos de la temperatura de referencia. El segundo, es del tipo Todo o Nada (TON) el cual permite mantener la temperatura del horno alrededor de la temperatura de referencia ( $\pm \Delta T$ ). Los dos lazos no pueden funcionar al mismo tiempo. Para esto, un relevador o relé acciona sus dos contactos permitiendo activar el PI o el TON. La orden de pasar de un lazo al otro es dada por el sistema de detección de cruce de umbrales. A cada reparación del PI y del TON, el componente considerado es degradado, es decir, que corre el riesgo de descomponerse mucho más rápido que antes (disminución de la esperanza del tiempo de buen funcionamiento  $t_{bf}$ ). Se puede entonces considerar que si el  $t_{bf}$  alcanza un valor promedio muy débil, esto implica que el componente falla casi inmediatamente después de su reparación, lo que significa que el componente ya no es funcional o está "muerto" y se tiene que reemplazar.

### Método propuesto

Se ha modelado el envejecimiento de los controladores y la falla del horno. Con respecto a los controladores, se ha utilizado la ley de Wei-

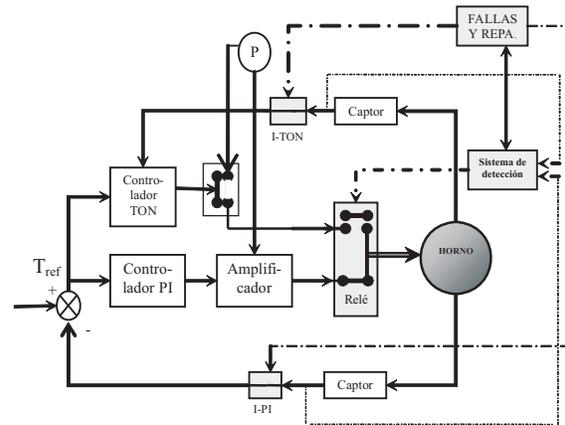


Figura 1. Diagrama estructural del sistema de control de la temperatura de un horno.

bull. El parámetro de escala del tiempo  $\eta$  (llamado también duración de vida característica) ha permitido definir el  $t_{bf}$  y la degradación de los componentes hasta su falla total. En lo que concierne al horno, dos modos distintos de funcionamiento le afectan: cuando su temperatura es controlada por el PI, el horno tiene un comportamiento continuo, su falla sigue una ley en función del tiempo. Por otro lado, cuando su temperatura es controlada por el TON funciona de manera discontinua: se enciende o apaga en función de los umbrales impuestos por el TON. Su probabilidad de falla depende entonces del número de conmutaciones. Al principio de la simulación, se efectúa el tiraje aleatorio para determinar el  $t_{bf}$  de los controladores ( $t_{bfPI}$  y  $t_{bfTON}$ ), el tiempo crítico  $t_{crit}$  de funcionamiento en modo PI soportado por el horno y el número crítico de conmutaciones  $n_{crit}$  provocadas por el funcionamiento en modo TON soportadas por el horno. Los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$  de la ley de Weibull son fijos. A cada falla constatada del controlador respectivo, se disminuye el parámetro  $\eta$  a través de un factor real  $\alpha$  como lo indica la ecuación siguiente:

$$\eta = \alpha \eta, \quad \text{donde } 0 < \alpha < 1. \quad (3)$$

Cuando el  $t_{bf}$  del controlador correspondiente es inferior a un valor predefinido  $t_{minBF}$  ( $t_{minBFPI}$  y  $t_{minBFTON}$ ), se reemplaza el controlador y se reinicia el valor de  $\eta$ . Se procede de la misma manera para los dos controladores. Con respecto al horno, por un lado se compara el tiempo de utili-

zación  $t_c$  del horno en modo PI con el  $t_{crit}$  y por el otro se compara también el número de conmutaciones  $n_{cc}$  sufridas por el horno en modo TON con el número de conmutaciones  $n_{crit}$  autorizadas. Cuando una de estas dos condiciones es verificada el horno ya no es más funcional:

$$\frac{t_c}{t_{crit}} \geq 1 \quad (4)$$

$$\frac{n_{cc}}{n_{crit}} \geq 1 \quad (5)$$

Estas dos condiciones son sin dimensiones y representan un porcentaje de utilización. La reparación del horno es también tomada en cuenta ( $\mu_F$ ).

## Autómata estocástico híbrido

### Definición

Un autómata estocástico híbrido es una 11-tupla

$$(\mathcal{X}, \mathcal{E}, \mathcal{A}, X, A, \mathcal{H}, \mathcal{F}, p, x_0, x_0, p_0) \quad (6)$$

en donde

- $\mathcal{X}$  es un conjunto finito de estados discretos  $\{x^1, x^2, \dots, x^m\}$ ,
- $\mathcal{E}$  es un conjunto finito de eventos  $\{e_1, \dots, e_r\}$  deterministas o estocásticos,
- $X$  es un conjunto finito de variables reales que evolucionan en el tiempo  $\{x_1, \dots, x_n\}$ ,
- $\mathcal{A}$  es un conjunto finito de arcos de la forma  $(x, e, G, R, x')$  donde:  $x$  y  $x'$  son los estados discretos origen y final del arco  $k$ ,  $e_j$  es el evento asociado al arco,  $G_k$  la condición de guarda sobre  $X$  en el estado discreto  $x$  y  $R_k$  es la función de reinicio de  $X$  en el estado  $x'$ ,
- $A: \mathcal{X} \times X \rightarrow (\mathbb{R}^{n+} \rightarrow \mathbb{R})$  es una función de "actividades" o "dinámicas" de cada estado discreto, que asocia a un elemento de  $\mathcal{X} \times X$  una función definida sobre  $\mathbb{R}^{n+}$  y a valores en  $\mathbb{R}$ ,
- $\mathcal{H}$  es un conjunto finito de relojes sobre  $\mathbb{R}$ ,
- $\mathcal{F}: \mathcal{H} \times (\mathbb{R} \times [0,1])$  es una aplicación que asocia a cada reloj una función de repartición,

-  $p_i^f$  es una distribución de probabilidades de transición de estado  $p(x^i | x^l, e)$  sobre la ocurrencia de un mismo evento hacia dos estados discretos diferentes.

-  $x^0, X_0$  y  $p_i^0$  corresponden respectivamente al estado discreto inicial, al valor inicial del vector de estado continuo en el estado inicial discreto y a la distribución inicial de probabilidades de transición en el estado inicial discreto.

Las duraciones de buen funcionamiento y de reparaciones de los componentes son materializadas por los relojes  $\mathcal{H}$ . Estas duraciones son obtenidas por tiros aleatorios a partir de las funciones de repartición de probabilidad  $\mathcal{F}$ . Los elementos  $\mathcal{X}$ ,  $\mathcal{E}$  et  $\mathcal{A}$  del AEH corresponden al autómeta a estados finitos que definen su parte discreta. Por otro lado,  $X$ ,  $A$ ,  $R$  y  $G$  definen su parte continua.  $\mathcal{H}$  corresponde a su aspecto temporal y, finalmente  $\mathcal{F}$  y  $p$  expresan su aspecto estocástico.

## Caso test

### Comportamiento del sistema

El AEH del sistema dinámico híbrido propuesto (Figura 2) funciona de la siguiente forma: al inicio del funcionamiento del sistema, la temperatura  $x$  del horno es controlada por el controlador PI (estado discreto 1). Al cabo de cierto tiempo aleatorio, el controlador falla con un  $\lambda_{PI}$  determinado por  $\eta_{PI}$  de la ley de Weibull. Como consecuencia, la temperatura del horno aumenta rápidamente (estado discreto 2). El sistema de detección de cruce de umbrales verifica que la temperatura del horno ha alcanzado un valor riesgoso ( $x \geq x_{smax}$ ) deduciendo que la temperatura del horno está fuera de control. El sistema de detección da entonces la orden al relevador de cambiar hacia el lazo del TON (estado discreto 3). El lazo del controlador PI está ahora abierto y el lazo del TON cerrado. La temperatura del horno es ahora controlada por el TON ( $x_{infTON} \leq x \leq x_{supTON}$ , estado discreto 3 y 4). El proceso de reparación del controlador PI es iniciado con un índice  $\mu_{PI}$  y un factor de degradación debido a su falla, ecuación (3). Sin embargo, existe la posibilidad de que el controlador TON venga inoperante después de una duración igualmente aleatoria ( $\lambda_{TON}$ ) deter-



del TON y del horno, los índices de reemplazo de los controladores, los umbrales de la temperatura mínima o máxima correspondientes a los controladores y al horno, la muerte de los controladores.

- $G = \{t = \text{rand}(h_1); t = \text{rand}(h_2); t = \text{rand}(h_3); t = \text{rand}(h_4); t = \text{rand}(h_5); t = \text{rand}(h_6); t = \text{rand}(h_7);$

$$t_{BFPI} \leq t_{\min BFPI}; \quad t_{BFTON} \leq t_{\min BFTON}; \quad \frac{t_c}{t_{\text{crit}}} \geq 1; \quad \frac{n_c}{n_{cc}} \geq 1;$$

$$x \leq x_{\inf H}; x \leq x_{s\min}; x \geq x_{s\max}; x \leq x_{\inf TON}; x \geq x_{\sup TON}.$$

- $X = \{x\}$ , la variable física del sistema: la temperatura.
- $A: X \times X \rightarrow \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}, f_{11}, f_{12}, f_{13}\}$ , las dinámicas en cada estado discreto del sistema.
- $R = \{x = x_{\text{crit}}\}$ , valor de reinicio de la temperatura  $x$  a la entrada de cada estado discreto y es el mismo que cuando el sistema ha quitado el estado discreto anterior (temperatura corriente  $x_{\text{crit}}$ ).  $R = \{h_1 := 0, h_2 := 0, h_3 := 0, h_4 := 0, h_5 := 0, h_6 := 0, h_7 := 0\}$ , los reinicios de los relojes que modelizan los tiempos de falla, de reparación y de remplazo de los controladores y del horno.
- $H = \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7\}$ , el tiempo de buen funcionamiento, el tiempo de reparación y el tiempo de reemplazo de los controladores y el tiempo de reparación del horno.

$$- F_1(h) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{h - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$$

viene de la ecuación (1) y modeliza el envejecimiento del PI y del TON. La ley exponencial es utilizada para determinar los índices de reparación y de reemplazo de los controladores y del horno:  $F_2(h) = 1 - \exp(-\lambda h)$ .

### Modelización y la simulación del caso test

Desde el punto de vista de la fiabilidad, el sistema tiene tres componentes: el controlador PI, el controlador TON y el horno. Los parámetros utilizados para la simulación de Monte Carlo son: con respecto al envejecimiento de los controladores PI y TON la ley de Weibull con  $\gamma=0$ ,  $\beta=2$ ,  $\eta_{PI}=52,700$  hr y  $\eta_{TON}=5,000$  hr. Tocante a la degradación de los controladores después de su re-

paración  $\eta_{PI}=0.8\eta_{PI}$  y  $\eta_{TON}=0.85\eta_{TON}$ . En relación a la falla del horno, el tiempo crítico  $t_{\text{crit}}$  cuando el horno está acoplado al PI, la ley normal: media  $287600$  hr, diferencia tipo =  $20000$  hr. Para el número de conmutaciones críticas  $n_{\text{crit}}$  cuando el horno está acoplado al TON la ley uniforme sobre  $[70,85]$ . Asimismo  $x_{s\max}=240^\circ\text{C}$ ,  $x_{s\min}=140^\circ\text{C}$ ,  $x_{\inf TON}=170^\circ\text{C}$ ,  $x_{\sup TON}=210^\circ\text{C}$ ,  $x_{\inf H}=170^\circ\text{C}$ ,  $t_{\min BFPI}=5270$  hr,  $t_{\min BFTON}=500$  hr.  $\mu_{PI}=14 \times 10^{-06}$   $\text{hr}^{-1}$ ,  $\mu_{TON}=10 \times 10^{-06}$   $\text{hr}^{-1}$ ,  $\mu_H=8 \times 10^{-06}$   $\text{hr}^{-1}$ .

Las ecuaciones diferenciales asociadas a los diferentes estados discretos del sistema son:

$$\text{estados 1 y 8: } \dot{x} + 0,0015x - 0,0015u_{\text{ref}} = 0 \quad (7)$$

$$\text{estado 2, 4, 6 y 9: } 1500\dot{x} + x - u_{\text{map}} = 0 \quad (8)$$

$$\text{estados 3 y 5: } 1500\dot{x} + x - u_{\text{mip}} = 0 \quad (9)$$

$$\text{estados 7, 10, 11, 12 y 13: } 1500\dot{x} + \exp(1/1500)x - u_s = 0 \quad (10)$$

en donde  $u_{\text{ref}} = 190^\circ\text{C}$  (temperatura de referencia),  $u_{\text{map}} = 300^\circ\text{C}$  (temperatura asíntota a potencia máxima),  $u_{\text{mip}} = 25^\circ\text{C}$  (temperatura asíntota a potencia mínima) y  $u_s = 25^\circ\text{C}$  (temperatura ambiente). Los valores escogidos para los diferentes parámetros tienen solamente una justificación pedagógica, se tiene como objetivo e interés mostrar que el estudio es posible y aplicable.

## Resultados

La Figura 3 presenta la simulación del AEH del sistema dinámico. La curva de arriba muestra los diferentes estados discretos en los cuales el sistema puede encontrarse. La curva de abajo presenta el comportamiento de la temperatura a través del tiempo. La curva muestra la muerte del PI y la falla del horno.

### Evaluación de los parámetros de la SdF

#### Fiabilidad del sistema

Para el estudio de la fiabilidad del sistema se ha efectuado una simulación de Monte Carlo volviendo absorbente los estados 7 y 11 del AEH de la Figura 2. La fiabilidad del sistema es la probabilidad que él esté en los estados 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12 y 13. El MTTF (mean time to failure) se ha aproximado por promedio del tiempo de acceso a

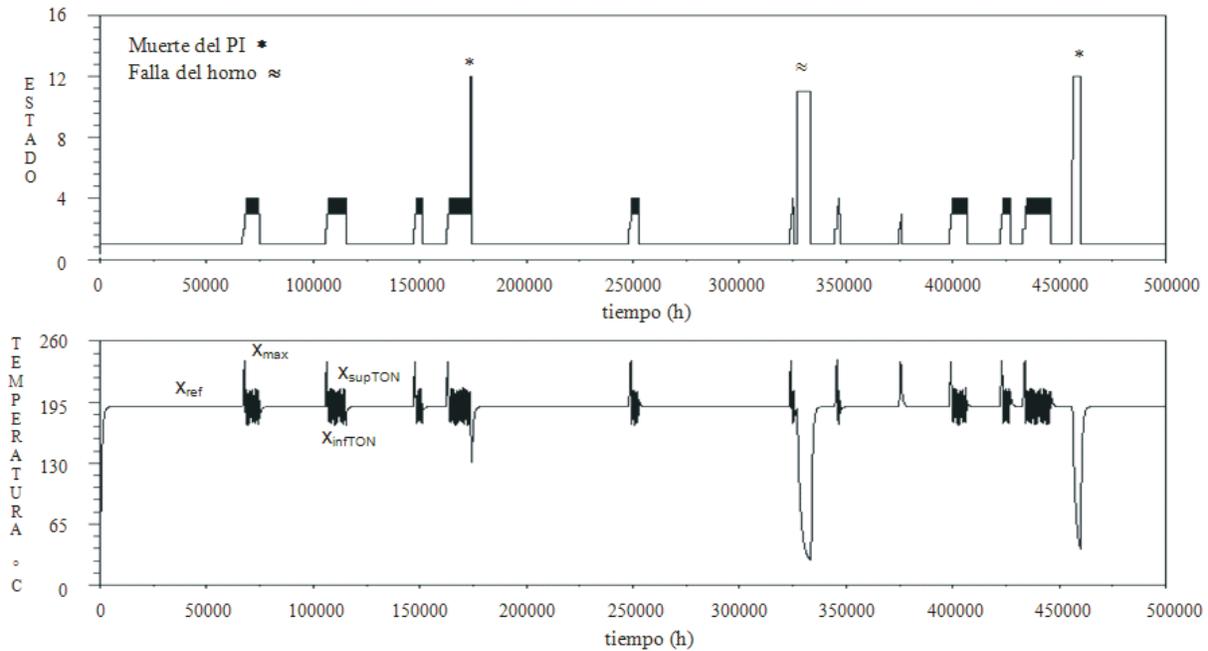


Figura 3. Simulación del sistema híbrido con el AEH.

los estados absorbentes (ProTAEA) sobre el conjunto de historias simuladas (una historia es el paso del sistema por una secuencia de estados de buen funcionamiento antes de llegar a los estados de falla del sistema, es decir, los estados 7 y 11). Se obtiene así un **MTTF = 1.517 × 10<sup>8</sup> hr**. Los resultados muestran que no es necesario hacer más de 1650 historias (Figura 4). La duración de simulación es del orden de 2 horas.

**Disponibilidad del sistema**

La disponibilidad A del sistema es la probabilidad que el sistema esté en estado de cumplir una función requerida en condiciones dadas en un instante dado. Se ha determinado la indisponibilidad  $\bar{A} = 1 - A$ . Los estados 7 y 11 son los estados de indisponibilidad del sistema en los cuales los controladores no controlan la temperatura del horno y el horno ya no es operacional. Para aproximar la disponibilidad asintótica, se considera como medida el tiempo promedio de estancia en los estados de indisponibilidad (T<sub>promSEI</sub>). Cuando el régimen asintótico es alcanzado se determina la indisponibilidad del sistema como la relación entre el tiempo de estancia acumulado en los estados de indisponibilidad (estados 7 y 11) y el tiempo de estancia acumulado en todos los estados, incluyendo los estados de indisponi-

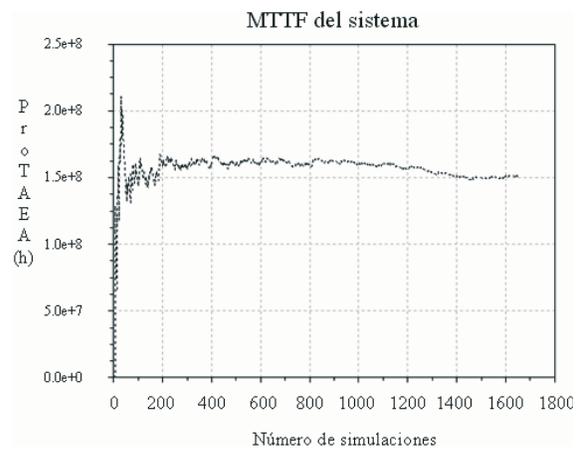


Figura 4. Tiempo promedio de acceso al estado de falla.

bilidad. La disponibilidad del sistema obtenida por simulación es **A = 99,97%**. Los resultados de la simulación muestran que sólo es necesario hacer 890 historias (Figura 5). La duración de la simulación es del orden de una hora.

**Mantenibilidad del sistema**

La mantenibilidad es la aptitud de una entidad a ser restablecida al instante *t* en un estado en el cual ella puede cumplir una función requere-

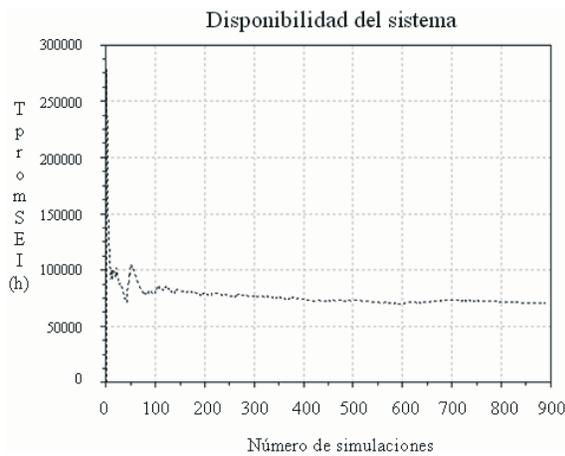


Figura 5. Tiempo promedio de estancia en el estado de indisponibilidad.

rida, sabiendo que está descompuesta desde el instante inicial. El MTTR (mean time to repair) se ha calculado como la esperanza matemática de la duración de reparación. Así pues, el MTTR se ha aproximado por el promedio del tiempo de acceso a los estados de funcionamiento (PromTAEF) con respecto al conjunto de historias simuladas (una historia es el paso del sistema de los estados discretos de falla 7 y 11 hacia el estado discreto de buen funcionamiento). La simulación efectuada nos da como resultado un **MTTR = 30843.358 hr**. Los resultados obtenidos por simulación (Figura 6) muestran que sólo es necesario efectuar 750 historias. El tiempo de simulación es del orden de una hora.

## Conclusión

Se ha podido modelizar y simular el envejecimiento de los controladores y la falla del horno utilizando diferentes leyes de probabilidad. La ley de Weibull ha permitido modelizar la duración de buen funcionamiento y la respectiva degradación de los controladores hasta su falla total. La ley normal y la ley uniforme han sido utilizadas para determinar la duración de buen funcionamiento del horno. La falla de éste interviene a causa de sus dos diferentes modos de comportamiento: el tiempo de utilización en régimen nominal, cuando está acoplado el controlador PI y al número de conmutaciones cuando está acoplado al controlador TON, en modo auxiliar. La ley exponencial ha sido utilizada para modelizar los tiempos de reparación de los controladores y del horno. Con

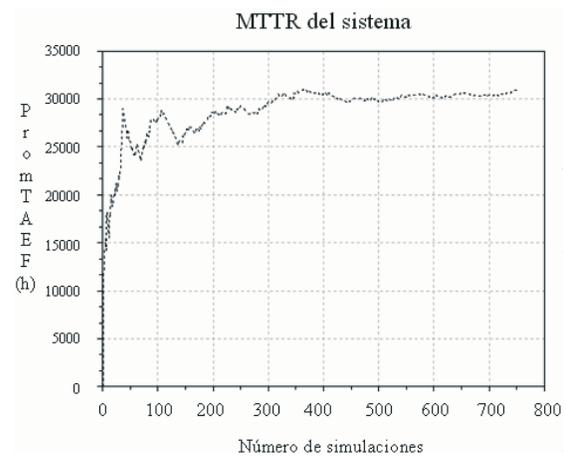


Figura 6. Tiempo promedio de acceso al estado de funcionamiento.

la ayuda del AEH se ha podido acceder a los parámetros de la SdF del sistema dinámico híbrido propuesto: la fiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad. Se ha podido mostrar que la aproximación es realizable y sólo resta el hecho de modificar los datos o parámetros del sistema con el fin de obtener resultados más realistas. Para reducir los tiempos de simulación se trabajará el ambiente gráfico de Scicos. La composición paralela de los autómatas será introducida con el fin de construir formalmente el AEH a partir de los autómatas de base del sistema. Esto facilitará la implementación del AEH en Scicos.

## Referencias bibliográficas

1. Pérez Castañeda G. A.: "Évaluation par simulation de la sûreté de fonctionnement de systèmes en contexte dynamique hybride". Thèse Doctorale. Nancy, France, Institut National Polytechnique de Lorraine (2009).
2. Pérez Castaneda G. A., Aubry J.-F. et Brinzei, B.: "Modélisation d'un système par automate stochastique hybride pour l'évaluation de la fiabilité dynamique". Journal européen des systèmes automatisés, Vol. 44, N° 2 (2010) pp. 231-255.
3. Smith D. J.: "Reliability, maintainability and risk". Butterworth Heinemann, 2001.
4. Grellier J. M., Oddi M. et Simon G.: "Maîtrise du vieillissement et de l'obsolescence des matériels électroniques à EDF". Fiabilité Maintenabilité  $\lambda\mu$  15 (2006).

5. Cipoire Y.: "Estimation d'une loi de Weibull pour des données de défaillance en âge et en distance". *Fiabilité-Maintenabilité*  $\lambda\mu$  15 (2006).
6. Clarotti C., Lannoy A., Odin S. and Procaccia H.: "Detection of equipment aging and determination of the efficiency of a corrective measure". *Reliability engineering & system safety* 84, (2004) pages 57-64.
7. Soro I. W., Nourelfath M. et Aït-Kadi D.: "Évaluation des indices de performance d'un système multi-états dégradable". 6<sup>e</sup> Conférence francophone de Modélisation et Simulation, Rabat, Maroc, (2006) pages 184-193.
8. Borgonovo E., Marseguerra M. and Zio E.: "A Monte Carlo methodological approach to plant availability modelling with maintenance, aging and obsolescence". *Reliability Engineering and System Safety* 67, (2000) pages 61-73.

Recibido el 2 de Noviembre de 2009

En forma revisada el 4 de Octubre de 2010