



MX0500290

*XVI Congreso Anual de la SNM y XXIII Reunión Anual de la SMSR*  
*XVI SNM Annual Meeting and XXIII SMSR Annual Meeting*  
Oaxaca, Oaxaca, México, Julio 10-13, 2005 / Oaxaca, Oaxaca, México, July 10-13, 2005

## **Predicción de Intervalos de Inspección Utilizando Análisis de Markov**

***Rogelio Rea, Juan Arellano***

*Instituto de Investigaciones Eléctricas*

*Calle Reforma 113, Colonia Palmira, Cuernavaca, Morelos - México*

*rrea@iie.org.mx; jag@iie.org.mx*

### ***Resumen***

Para resolver el inmanejable número de estados de Markov de sistemas que tienen un gran número de componentes, se propone una modificación al método de Markov, denominado *Análisis de Markov Truncado*, en el que se asume que es despreciable la dependencia entre fallas de componentes. Con ello el número de estados se incrementa de forma lineal (no exponencial) con el número de componentes del sistema, simplificando enormemente el análisis. Como ejemplo, el método propuesto fue aplicado al sistema HPCS de la CLV considerando sus 18 componentes principales. Se plantea que cada componente puede tomar tres estados: operacional, con falla oculta y con falla revelada. Adicionalmente, se toma en cuenta la configuración del sistema HPCS por medio de un diagrama de bloques de confiabilidad para estimar su indisponibilidad a nivel sistema. Los resultados del modelo aquí propuesto se comparan con otros métodos y aproximaciones utilizadas para simplificar los análisis de Markov. Se propone también la modificación de los intervalos de inspección de tres componentes del sistema HPCS. Esto último con base en el modelo de Markov desarrollado y en el tiempo máximo permitido por el código ASME (NUREG-1482) para inspeccionar componentes de sistemas que se encuentran en reserva en centrales nucleares.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Mantener altos niveles de seguridad en las plantas nucleares es una tarea de muy alta prioridad. Por ello, la industria emplea las técnicas más avanzadas para analizar la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas que componen las centrales nucleoelectricas. En este contexto, el método de Markov permite estimar los parámetros mencionados utilizando un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden. La solución de ese conjunto de ecuaciones puede estimar la probabilidad de que un sistema se encuentre en un estado determinado. Sin embargo, el propio método de Markov puede presentar problemas cuando se analizan sistemas que tienen un gran número de componentes. Esto se debe a que el número de estados en que puede estar un sistema, crece de forma exponencial con el número de componentes [1].

En este trabajo se propone el uso de una nueva modificación del método de Markov en la que se asume que es despreciable la dependencia entre las fallas de los componentes, i.e. los estados del sistema con más de un componente fallado se ignoran. De esta forma, el número de estados se incrementa de forma lineal (no exponencial) con el número de componentes que integran el

sistema, simplificando enormemente el análisis. Como un ejemplo, el nuevo método propuesto, denominado *Análisis de Markov Truncado*, ha permitido calcular la indisponibilidad del sistema HPCS de la Central Laguna Verde (CLV) considerando sus 18 componentes principales, con sus diferentes intervalos de inspección, de una manera extremadamente eficiente, dado que el número de estados a considerar se reduce de manera importante. Los intervalos de inspección se han determinado con base en el documento NUREG-1482 [2] que establece el tiempo máximo permitido para inspeccionar componentes de sistemas que se encuentran en reserva en centrales nucleares.

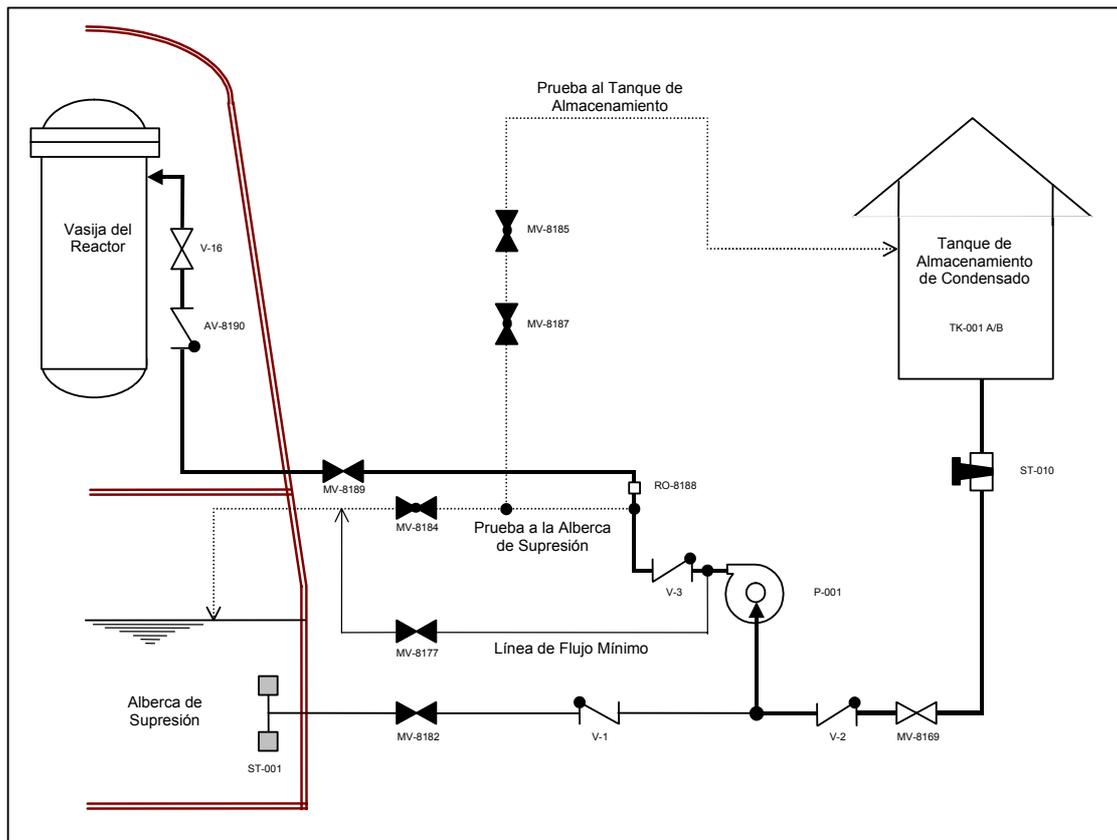
## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HPCS

El Sistema de Aspersión del Núcleo a Alta Presión (HPCS, por sus siglas en inglés) es un sistema en reserva (*standby*) que forma parte de los Sistemas de Enfriamiento de Emergencia del Núcleo (ECCS, por sus siglas en inglés) de la CLV. El HPCS tiene como propósito principal el restablecer el adecuado enfriamiento del núcleo y mantener la continuidad en su enfriamiento en caso de que se presente un accidente de pérdida de refrigerante (LOCA, por sus siglas en inglés) o cualquier evento que cause un decremento de nivel. En caso de ocurrencia de tales eventos, se presentará una señal de “bajo nivel en la vasija del reactor” o una señal de “alta presión en el pozo seco”. Cuando se presenta cualquiera de las señales mencionadas, el sistema HPCS inicia de forma automática la aspersión del núcleo en pocos segundos sin necesidad de que se tenga que realizar un previo calentamiento o lubricación de cualquiera de sus componentes.

La configuración del sistema HPCS se muestra en la Figura 1; cuenta con dos válvulas de succión, una de ellas del tanque de almacenamiento de condensado (MV-8169) y la otra de la alberca de supresión (MV-8182). Para una referencia rápida los identificadores que se describen entre paréntesis se muestran en la figura mencionada. El sistema incluye una bomba centrífuga (P-001), una válvula de flujo mínimo (MV-8177), dos válvulas en la línea de prueba al tanque de almacenamiento (MV-8185 y MV-8187) así como una válvula en la línea de prueba a la alberca de supresión (MV-8184). El sistema HPCS cuenta también con una válvula de inyección (MV-8189) y dos válvulas de aislamiento dentro de la contención primaria: una de ellas es una válvula de retención probada con aire (AV-8190) y una válvula manual que permanece abierta (V-16). Finalmente, el sistema HPCS tiene un anillo aspersor colocado sobre el núcleo del reactor.

La trayectoria preferencial que utiliza el sistema HPCS es la succión desde el tanque de almacenamiento de condensado, a través de la motoválvula (MV-8169), a la bomba principal del sistema (P-001). El agua fluye a la válvula de retención (V-3) y aguas arriba al orificio restrictor (RO-8188), localizado en la descarga de la bomba principal. El flujo continúa a la motoválvula (MV-8189), luego a la válvula operada por aire (AV-8190), posteriormente a la válvula de retención (V-16) para concluir en el aspersor del sistema.

La succión de la bomba principal se transfiere de forma automática a la alberca de supresión cuando existe una señal de bajo nivel en el tanque de almacenamiento de condensado, o bien cuando se presenta un alto nivel en la alberca de supresión. En este caso, la válvula de succión de la alberca de supresión (MV-8182) recibirá una señal de apertura y cuando haya realizado su apertura total se enviará una señal a la motoválvula (MV-8169) para que cierre automáticamente.



**Figura 1. Diagrama simplificado del sistema HPCS [3].**

Cuando el sistema HPCS opera con bajo flujo, la descarga de la bomba principal se envía a la alberca de supresión a través de la línea de flujo mínimo por medio de la apertura de la motoválvula (MV-8177). Si la capacidad de flujo excede los 30 lt/s la mencionada motoválvula cierra y el sistema HPCS operará en lo que se denomina condiciones normales de operación.

Con el objetivo de probar la funcionalidad del sistema HPCS se tienen dos líneas de prueba. Una de ellas es la prueba al tanque de almacenamiento de condensado. Esa línea cuenta con dos motoválvulas (MV-8185 y MV-8187) que pueden abrirse o cerrarse desde el cuarto de control. Si se presenta una señal de inicio del sistema, cuando las mencionadas válvulas están abiertas, ambas válvulas reciben una señal de cierre para que el flujo se envíe hacia la línea de inyección del sistema. Una situación similar se presenta en la línea de prueba a la alberca de supresión, que cuenta con una motoválvula (MV-8184) normalmente cerrada. Cuando se opera el sistema HPCS en cualquiera de sus líneas de prueba (al tanque de almacenamiento y a la alberca de supresión) la válvula de inyección del sistema (MV-8189) permanecerá cerrada.

Cuando se detecta una señal de inicio del sistema, se presentan una serie de acciones automáticas que progresan en el siguiente orden:

- Señal de apertura de MV-8189 (normalmente cerrada).

- Señal de cierre de MV-8187, MV-8185 y MV-8184 en caso de que se encuentren abiertas (normalmente cerradas).
- Señal de apertura de MV-8169 en caso de que se encuentre cerrada (normalmente abierta).
- Señal de arranque de la bomba principal (P-001).

La válvula de inyección del sistema HPCS (MV-8189) cerrará automáticamente cuando se alcance un alto nivel en la vasija del reactor. En este caso, la bomba principal del sistema operará en condición de flujo mínimo a la alberca de supresión y la válvula de inyección de nuevo abrirá automáticamente cuando se presente un bajo nivel en la vasija del reactor. Este ciclo se repetirá hasta que se logre estabilizar el nivel en la vasija del reactor.

### 3. ANÁLISIS DE MARKOV EN LA INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

El análisis de Markov es una técnica que consiste en modelar el comportamiento de un sistema dado por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden (una por cada estado del sistema). Su objetivo es determinar  $P_i(t)$ , la probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado  $i$  a un tiempo  $t$  [4].

#### 3.1 El Análisis de Markov

El primer paso para llevar a cabo un Análisis de Markov es definir qué componentes de un sistema serán analizados y su relación funcional. Esta idea se explica con un ejemplo muy sencillo: suponga que se tiene un sistema con tres componentes; existen entonces ocho posibles combinaciones de estados si se asume que cada componente podría estar en un estado fallado u operando. En la Tabla I se muestran los ocho posibles estados del sistema.

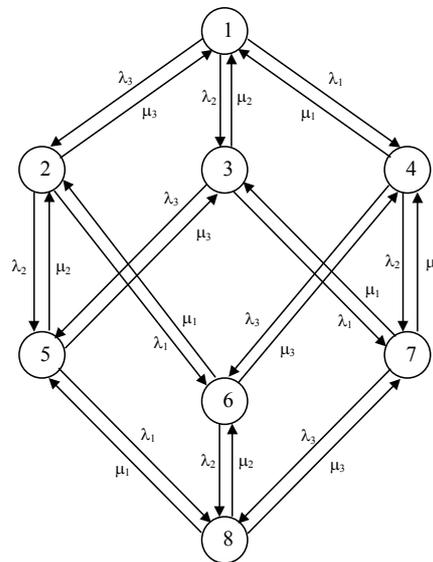
**Tabla I. Estados de Markov para un sistema de tres componentes**

Componente	Estados							
	1	2	3	4	5	6	7	8
COMP-1	1	1	1	0	1	0	0	0
COMP-2	1	1	0	1	0	1	0	0
COMP-3	1	0	1	1	0	0	1	0

Nota: 1=operando; 0=fallado

En la Tabla I se muestra como el sistema “pasa” del estado 1 al estado 2, 3 o 4 cuando ha ocurrido la falla de los componentes 3, 2 o 1, respectivamente. Del estado 2 el sistema podría pasar ya sea a los estados 5 o 6; del estado 3 el sistema sólo pasa a los estados 5 o 7. El estado 4 pasa a los estados 6 o 7. Finalmente, si el sistema está en los estados 5, 6 o 7 solamente podrá pasar al estado 8, en donde todos los componentes se encuentran fallados. En la primera transición, el sistema pasó de un estado sin componentes fallados a uno de tres estados con un solo componente fallado. Luego, el sistema pasa a estados con dos componentes fallados a partir de estados que ya tenían un componente fallado, y así sucesivamente.

Los “cambios de estado” del sistema referidos en el párrafo anterior, se conocen como tasas de transición en el Análisis de Markov. Si un componente cambia de un estado en operación a un estado fallado ese cambio se podría caracterizar por medio de una tasa que defina la falla de un componente en particular, i.e. la tasa de falla,  $\lambda$ . Si un componente se repara, el estado cambia de un estado en el que el componente estaba fallado a un estado en operación; ese cambio de estado puede ser caracterizado por medio de la tasa de reparación,  $\mu$ . Por ejemplo, en el estado 1 (Tabla I) el componente 1 falla y el sistema cambia al estado 4 con una tasa de falla  $\lambda_1$  y regresa al estado 1 con una tasa de reparación  $\mu_1$ . La lógica en la transición del sistema entre diferentes estados muchas veces se explica por medio de un diagrama de transición de estados, mejor conocido como diagrama de Markov. En la Figura 2 se muestra el diagrama de transición de estados para el ejemplo del sistema con tres componentes. En ese diagrama se muestran las tasas de falla y reparación para los componentes 1, 2 y 3.



**Figura 2. Diagrama de transición de estados para un sistema de tres componentes.**

La probabilidad de cambio del estado 1 a los estados 2, 3 o 4 durante  $\Delta t$  es  $\lambda_3 \Delta t$ ,  $\lambda_2 \Delta t$ , y  $\lambda_1 \Delta t$ , respectivamente. Adicionalmente, para cada transición que sale del estado 1 existe una llegada a ese estado cuando se ha reparado el sistema. Las transiciones de los estados 2, 3 y 4 al estado 1 son  $\mu_3 \Delta t$ ,  $\mu_2 \Delta t$ , y  $\mu_1 \Delta t$ , respectivamente. Si se desea determinar la probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado 1 a un tiempo  $t$ , el cambio neto entre  $t$  y  $t + \Delta t$  de que el sistema estará en el estado 1 podría escribirse de la siguiente forma:

$$P_1(t + \Delta t) - P_1(t) = -(\lambda_3 + \lambda_2 + \lambda_1) \Delta t P_1(t) + \mu_3 \Delta t P_2(t) + \mu_2 \Delta t P_3(t) + \mu_1 \Delta t P_4(t) \quad (1)$$

o expresado en forma diferencial:

$$\frac{d}{dt} P_1(t) = -(\lambda_3 + \lambda_2 + \lambda_1) P_1(t) + \mu_3 P_2(t) + \mu_2 P_3(t) + \mu_1 P_4(t) \quad (2)$$

De la misma forma pueden obtenerse el resto de las ecuaciones diferenciales. Si existen muchas ecuaciones entonces podrían reorganizarse las ecuaciones diferenciales por medio del uso de métodos matriciales [4, 5]. La forma de las ecuaciones de Markov cuando se expresan en forma matricial es como sigue:

$$\frac{d}{dt}P(t) = MP(t) \tag{3}$$

Donde P es el vector columna con los componentes  $P_1(t), P_2(t), \dots$ , y M es lo que se conoce como la Matriz de Transición de Markov [4]. El diagrama de transición de estados se utiliza para construir la Matriz de Transición de Markov y para el ejemplo del sistema de tres componentes la mencionada matriz se muestra en la Figura 3.

$$\begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) & \mu_3 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_3 & -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3) & 0 & 0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & 0 & -(\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_2) & 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & 0 & -(\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1) & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3) & 0 & 0 & \mu_1 \\ 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_3 & 0 & -(\lambda_2 + \mu_1 + \mu_3) & 0 & \mu_2 \\ 0 & 0 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 & -(\lambda_3 + \mu_1 + \mu_2) & \mu_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & -(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) \end{bmatrix}$$

**Figura 3. Matriz de transición para un sistema de tres componentes.**

La solución de la ecuación 3 se obtiene por diferentes métodos. En este trabajo se han utilizado tres métodos: Runge-Kutta, método de Euler y descomposición espectral [6, 7].

### 3.2 Valor Asintótico o Estado Estable de la Disponibilidad de Sistemas

Cuando en un sistema se permite la reparación de sus componentes después de que han fallado, se espera que eventualmente se alcance el valor de estado estable o asintótico de disponibilidad. En esos estados las probabilidades son constantes, independientemente del tiempo. Ese valor se calcula haciendo  $t \rightarrow \infty$  en la ecuación 3. Los elementos en el vector columna P llegan a ser constantes y sus coeficientes diferenciales deben ser cero.

$$\frac{d}{dt}P(\infty) = 0 \tag{4}$$

Todas las matrices de transición de Markov son singulares: las N ecuaciones son linealmente dependientes, lo que lleva a tener N-1 relaciones independientes [4]. Estas ecuaciones se resuelven aplicando una consideración adicional:

$$\sum_i P_i(\infty) = 1 \quad (5)$$

La solución de un conjunto de ecuaciones diferenciales se reduce entonces a la solución de un conjunto de ecuaciones lineales [5, 8].

### 3.3 Problemas en el Análisis de Markov y uso de aproximaciones

En general, un sistema tendrá  $2^n$  estados donde  $n$  es el número de componentes en el sistema. El número de estados se incrementa de forma exponencial con  $n$ , y consecuentemente el número de ecuaciones diferenciales que necesitan resolverse. En estos casos se requiere el uso de métodos de integración numérica para obtener la solución de las ecuaciones [9]. Cuando se agrega alguna suposición adicional, tal como tener tasas de falla de componentes que son dependientes del tiempo (no constantes), entonces algunos autores como Lewis [4] sugiere el uso de simulaciones de Monte Carlo.

La construcción de la matriz de transición es una tarea laboriosa cuando el número de coeficientes es muy grande. Su construcción es muy sistemática, pero podría incurrirse en errores de captura de datos. Por ejemplo, un sistema con cinco componentes tiene  $2^5$  estados, i.e. 32 estados. La matriz de transición manejará  $32 \times 32$  coeficientes que hacen un total de 1024 elementos en la matriz de transición. Si se analizara un sistema con seis componentes el número de coeficientes en la matriz de transición sería de 4096. Un sistema con siete componentes llevaría a tener que capturar 16384 elementos en la matriz de transición, y así sucesivamente. El número de elementos crece aun más rápido si cada componente de un sistema puede tener más de dos posibles estados.

En este trabajo se utilizaron dos tipos de aproximaciones para resolver el problema del manejo de un gran número de coeficientes en la matriz de transición. A continuación se describen cada uno de ellos.

#### 3.3.1 Síntesis de las tasas de falla y reparación de componentes

Una aproximación que ha sido probada en este trabajo consiste en reducir un subsistema, con componentes en serie o en paralelo, a un componente único con parámetros específicos.

Para un subsistema en serie que contiene  $n$  componentes, sus tasas de falla y reparación equivalentes pueden calcularse a partir de las siguientes ecuaciones obtenidas en la referencia [7]:

$$\lambda = \sum_i^n \lambda_i \quad (6)$$

$$\mu = \frac{\lambda}{\left( \sum_i^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} \right)} \quad (7)$$

De la misma forma, para subsistemas con  $n$  componentes en paralelo la misma referencia propone la aplicación de las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = \left( \prod_i^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} \right) \left( \sum_i^n \mu_i \right) \quad (8)$$

$$\mu = \sum_i^n \mu_i \quad (9)$$

Con el uso de estas ecuaciones es posible reducir de forma drástica el número de estados que se utilizan en el diagrama de transición de estados debido a que se reduce el número de componentes bajo análisis.

### 3.3.2 Análisis de Markov Truncado

Una nueva aproximación para reducir el tamaño de la matriz de transición y que ha sido probada en este trabajo es realizar lo que se le ha denominado un *Análisis de Markov Truncado* [6]. En este trabajo, el término “truncado” indica que sólo se analizan y toman en cuenta aquellos estados en los que no se presenta más de un componente fallado. El resto de las probabilidades de los demás estados debe sumar uno, tal y como fue establecido en la ecuación 5.

Esta nueva aproximación se aplicó al análisis del sistema HPCS considerando tanto fallas reveladas (evidentes) como no reveladas (también conocidas como ocultas). El considerar fallas ocultas en el análisis incrementa aun más el posible número de estados en el sistema. De esta forma, el uso de una aproximación como la que se propone en este trabajo es muy necesario. Primeramente, se consideraron únicamente fallas reveladas para el cálculo de la indisponibilidad asintótica con el método de Markov truncado y se compararon los resultados con un análisis de Markov completo. La necesidad real del uso de la aproximación de Markov truncado ocurre cuando se requiere analizar el sistema HPCS considerando que puede presentar fallas ocultas. Esto se debe a que el número de posibles estados del sistema produciría un número inmanejable de ecuaciones que necesitan resolverse. Este hecho será discutido con detalle en la sección 4 de este trabajo, donde se propone un nuevo modelo para analizar la disponibilidad del sistema HPCS de la CLV.

### 3.4 Diagrama de Bloques de Confiabilidad del Sistema HPCS

Para realizar el cálculo de indisponibilidad de un sistema utilizando Análisis de Markov se deben determinar los posibles estados en los que el sistema podría estar fallado. Para ello, se construyó un Diagrama de Bloques de Confiabilidad (RBD, por sus siglas en inglés) para el sistema HPCS, que se muestra en la Figura 4. El RBD mencionado muestra las diferentes combinaciones de los componentes del sistema, tanto en serie como en paralelo, en las que el sistema HPCS podría no operar en caso de ser requerido.

En el RBD construido se han incluido los identificadores de los componentes del sistema HPCS que coinciden con los que se utilizan en la Figura 1. Adicionalmente, se han agregado las tasas de

falla, de reparación y los tiempos de inspección para los diferentes modos de falla de los componentes que conforman el sistema HPCS [3, 6].

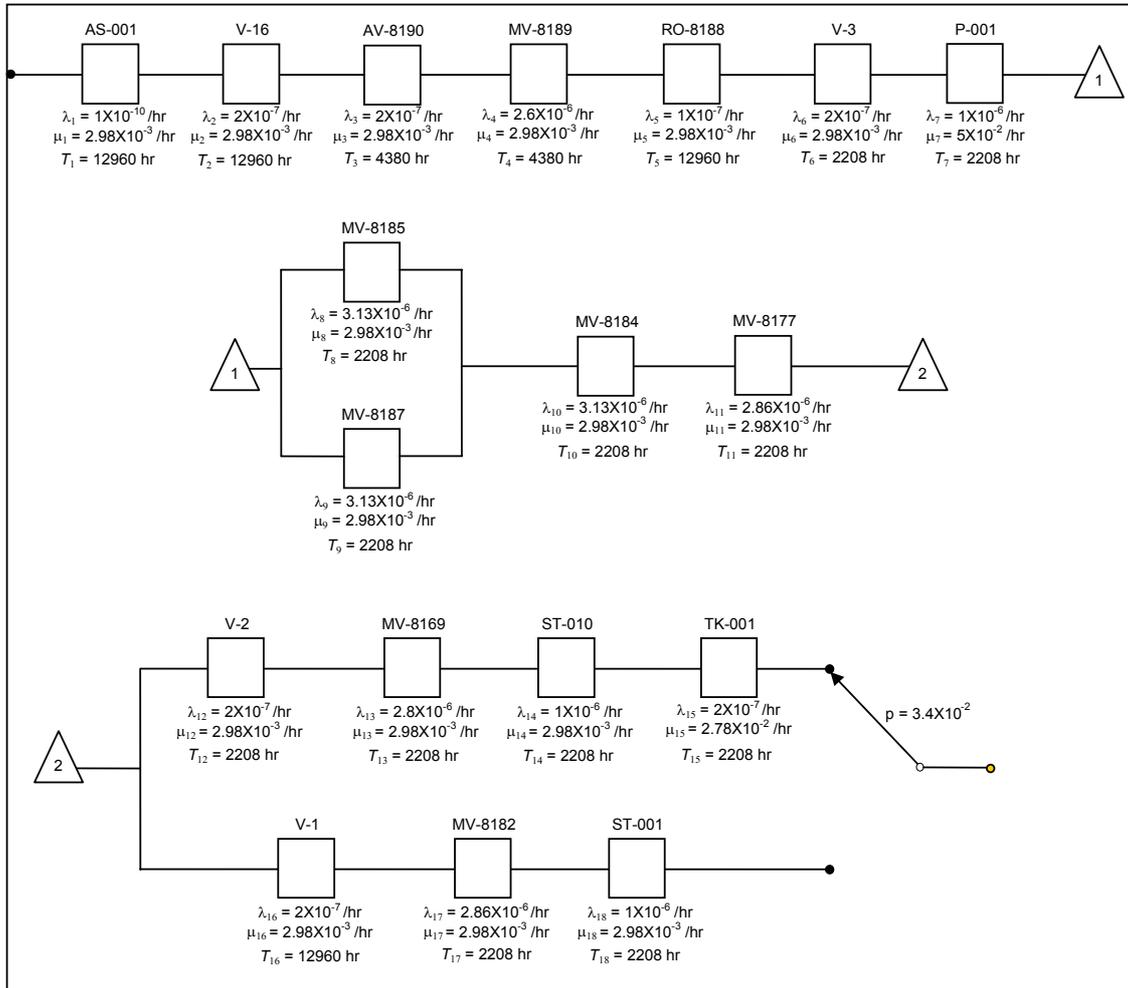


Figura 4. Diagrama de bloques de confiabilidad del sistema HPCS.

### 3.5 Resultados del Análisis del Sistema HPCS Considerando Fallas Reveladas

El considerar sólo fallas reveladas indica que las fallas que se presentan en el sistema HPCS se detectan al momento en que ocurren. Por lo tanto, en esta etapa del análisis los intervalos de inspección de componentes no necesitan definirse. Esta etapa se realiza para verificar la precisión del uso de aproximaciones y su comparación con los valores de indisponibilidad obtenidos con el *Análisis de Markov Truncado* que se propone en este trabajo. Los resultados se muestran en la Tabla II. Obviamente, los valores reportados en esa tabla son optimistas en comparación con los reportados en los Análisis Probabilísticos de Seguridad para reactores BWR; esta situación ocurre porque nuestro cálculo ha incluido hasta ahora únicamente fallas reveladas. El caso que incluye fallas ocultas se trata en la sección 4.2.

**Tabla II. Comparación de indisponibilidad del sistema HPCS considerando fallas reveladas**

Método de Solución	Consideraciones	Indisponibilidad
1. Análisis de Markov Completo (con 5 subsistemas)	Para resolver el problema de manejar $2^{18}$ estados, se reduce el número de componentes del sistema HPCS por medio de las ecuaciones que se presentan en la sección 3.3.1. Así, se analiza el sistema HPCS integrado por cinco subsistemas; el subsistema A incluye seis componentes en serie (Ver Figura 4) AS-001, V-16, AV-8190, MV-8189, RO-8188 y V-3. El subsistema B incluye al componente P-001. El subsistema C incluye todos los componentes de las líneas de prueba al tanque (MV-8185 y MV-8187), a la alberca de supresión (MV-8184) y de flujo mínimo (MV-8177). El subsistema D toma en cuenta todos los componentes de la línea de succión desde el tanque de condensado (V-2, MV-8169, ST-010 y TK-001). Por último el subsistema E incluye los componentes de la línea de succión desde la alberca de supresión (V-1, MV-8182 y ST-001). De esta forma, el número de estados de Markov es de $2^5 = 32$ estados y la matriz de transición maneja 1024 coeficientes.	$3.212 \times 10^{-3}$
2. Análisis de Markov Completo (con 5 subsistemas)	Mismo caso anterior con la consideración de que el <i>switch</i> de transferencia de la succión del tanque de condensado tiene una probabilidad de falla de cero. Se consideran los mismos 32 estados de Markov y la matriz de transición continua manejando 1024 coeficientes.	$3.137 \times 10^{-3}$
3. Análisis de Markov Truncado (con 5 subsistemas)	El análisis considera sólo 6 estados. Un estado con todos los subsistemas operando y cinco estados con una falla en cada uno. Este análisis presenta una gran simplificación con respecto a los casos anteriores pues la matriz de transición incluye solo 36 coeficientes.	$3.185 \times 10^{-3}$
4. Análisis de Markov Truncado (con 18 componentes)	La diferencia que existe con el análisis previo es que ahora se consideran los 18 componentes que integran el sistema HPCS. De esta forma el análisis incluye 19 estados y la matriz de transición maneja 361 coeficientes.	$3.094 \times 10^{-3}$
5. Tradicional (con 18 componentes)	Se calcula la indisponibilidad del sistema HPCS a partir del cálculo de las indisponibilidades individuales de sus componentes. Se utiliza el RBD que se muestra en la Figura 4 y la teoría para calcular la indisponibilidad de sistemas que tienen componentes en serie y en paralelo [4, 6].	$3.138 \times 10^{-3}$

#### 4. UN NUEVO MODELO DE MARKOV PARA ANALIZAR SISTEMAS EN RESERVA

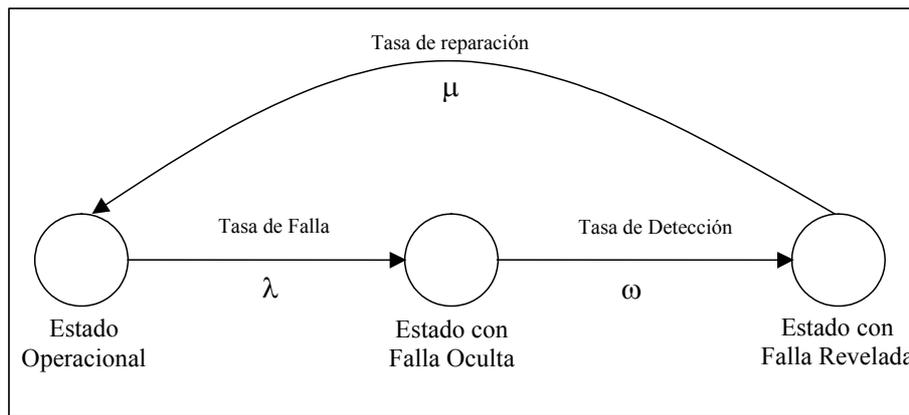
El modelo que se propone en este trabajo considera que cada componente del sistema HPCS puede encontrarse en tres condiciones diferentes, lo que conduce a tener  $3^n$  estados que deben analizarse, donde  $n$  es el número de componentes del sistema. En la Figura 5 se muestra el nuevo modelo de Markov para analizar los componentes del sistema HPCS, considerando que puede

presentar fallas ocultas. Los datos para llevar a cabo los cálculos de indisponibilidad con este nuevo modelo se han presentado en la Figura 4.

#### 4.1 Descripción del Modelo

De la Figura 5 resulta claro lo siguiente:

- Todos los componentes que se encuentran en un estado operacional tienen una tasa de falla constante  $\lambda$ , y un tasa de reparación  $\mu = 0$  debido a que, si ocurre una falla, ésta no puede repararse de forma inmediata porque la falla es oculta.
- Los componentes que están en un estado fallado tienen una tasa de reparación que inicia al momento que se realiza la inspección, i.e. si un componente se encontraba en un estado operacional al momento de la inspección, su tasa de reparación es cero hasta que una siguiente inspección detecta su estado fallado. En este caso la falla es revelada al momento de la inspección y no al momento en que ocurre la falla.
- Todas las fallas reveladas se reparan a su tasa de reparación para regresar al componente a su estado operacional. Una vez que está en operación su tasa de reparación regresa a su valor de cero.



**Figura 5. Análisis de Markov considerando falla no reveladas**

Del modelo propuesto, se desconoce el parámetro denominado tasa de detección ( $\omega$ ). Este parámetro se define como el inverso del tiempo que un componente se encuentra en un estado con falla oculta. Esta definición asume que ese tiempo puede modelarse como una distribución exponencial. Los detalles relacionados con la derivación matemática de la tasa de detección se reportan en la referencia [6]. De acuerdo con la citada referencia, la tasa de detección puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$\omega = \lambda \left[ \frac{1 - e^{-\lambda T_0}}{\lambda T_0 - 1 + e^{-\lambda T_0}} \right] \quad (10)$$

La tasa de detección,  $\omega$ , para cada componente puede determinarse si se conocen su tasa de falla,  $\lambda$ , y su tiempo de inspección,  $T_0$ .

#### 4.2 Análisis del sistema HPCS considerando fallas ocultas

El *Análisis de Markov Truncado* del sistema HPCS, considerando fallas ocultas, conduce a analizar solamente 37 estados en lugar de  $3^{18}$  estados. El primer estado incluye todos los componentes en un estado operacional, 18 estados incluyen componentes con una falla oculta en cualquier componente específico y 18 estados incluyen componentes con una falla revelada en cada componente.

Se considera que el sistema HPCS estará inoperable si presenta ya sea una falla oculta o una falla revelada. La indisponibilidad del sistema HPCS se calcula mediante la suma de las probabilidades de los estados en que no está operando, i.e. estados con una falla oculta o con una falla revelada. Específicamente, para el modelo desarrollado, el sistema HPCS estará fallado si cualquiera de las siguientes condiciones está presente (Ver Figuras 1 y 4):

- Ocurre una falla en cualquiera de los componentes que se localizan en la línea de inyección (AS-001, V-16, AV-8190, MV-8189, RO-8188, V-3 y P-001).
- Ocurre una falla en la MV-8184, localizada en la línea de prueba a la alberca de supresión.
- Ocurre una falla en la MV-8177, localizada en la línea de flujo mínimo.

La matriz de transición para este caso maneja 1369 coeficientes y se ha calculado un valor de indisponibilidad del sistema HPCS, considerando fallas ocultas, de  $1.759 \times 10^{-2}$ .

#### 4.3 Determinación de intervalos de inspección del sistema HPCS

La determinación de los intervalos de inspección del sistema HPCS se basa en el modelo descrito en la sección anterior. El modelo desarrollado permite variar de forma conveniente el tiempo de inspección de los componentes del sistema, y mediante esa variación se recalculan los nuevos valores de indisponibilidad.

Las especificaciones técnicas de operación de centrales nucleares que regulan los intervalos de inspección de componentes, se basan en el código ASME. En particular, la sección XI del mencionado código requiere que se realice una inspección trimestral a la bomba principal del sistema HPCS. Este valor ha sido considerado en el APS de la CLV [3]. Sin embargo, el mismo código ASME requiere que se realicen inspecciones trimestrales a las válvulas asociadas al sistema HPCS. El código permite realizar inspecciones semestrales cuando las inspecciones trimestrales son imprácticas, ya sea por limitaciones de diseño, exposición a la radiación del personal en ciertos modos de operación, o bien por pruebas que podrían causar un disparo de la planta o que requiera una reducción de potencia.

En lugar de incrementar los tiempos de inspección de ciertos componentes del sistema HPCS, lo cual requeriría que se enviara una justificación al organismo regulador de la CLV, la propuesta en este trabajo es disminuir el tiempo de inspección de un componente hasta un valor que pueda

compararse con el tiempo de inspección de componentes similares. Por ejemplo, la válvula de inyección del sistema HPCS (MV-8189) que se encuentra fuera de la contención primaria, se inspecciona cada seis meses de acuerdo con el APS de la CLV [3]. Lo que se propone es, de resultar práctico, inspeccionar la mencionada válvula trimestralmente (definido por las especificaciones técnicas de operación como 92 días) que es comparable con el valor de las válvulas (MV-8184, MV-8185 y 8187) o las válvulas de succión del sistema HPCS (MV-8182 o MV-8169). Con esta sola acción, se reduce la indisponibilidad del sistema HPCS en un 14.07%.

Existen dos componentes más que se propone que tengan nuevos intervalos de inspección. El primero es el orificio restrictor (RO-8188) cuyo tiempo de inspección es cada 18 meses (cuando se tiene la recarga del reactor). Se propone inspeccionar ese componente cada trimestre debido a que el orificio restrictor se localiza aguas arriba de la bomba principal (después de la válvula de descarga V-3) que se inspecciona cada tres meses. Con este cambio, junto con el propuesto para la válvula de inyección, reduciría la indisponibilidad del sistema HPCS en un 16.49%. El segundo componente para el que se propone un nuevo intervalo de inspección es la válvula *check* que se encuentra en la línea de succión de la alberca de supresión (V-1). Todos los componentes en la línea mencionada se inspeccionan cada trimestre y la válvula (V-1) es el único que se inspecciona cada 18 meses. Entonces, se propone que este componente se inspeccione cada tres meses junto con todos los componentes que se encuentran en la línea de succión de la alberca de supresión. Si bien este último cambio en el intervalo de inspección de la válvula (V-1) incrementa la indisponibilidad del sistema (en 0.073%) no existen prohibición alguna del código ASME para inspeccionar esta válvula más frecuentemente.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cuando se calcula la indisponibilidad de un sistema por medio de un Análisis de Markov con eventos independientes o algún método tradicional, el resultado debe ser el mismo [4]. Sin embargo, el Análisis de Markov completo realizado para el HPCS requirió el uso de aproximaciones. En la práctica, el hecho de construir una matriz de transición con  $2^{18} \times 2^{18}$  coeficientes, a mano, hubiese consumido mucho tiempo sin ganar mucho en la precisión de los resultados. La comparación de los valores de indisponibilidad obtenidos de estos dos análisis muestra que las ecuaciones empleadas por Blin [7] arrojan un valor muy preciso con menos de 0.04% de diferencia entre los casos 2 y 5 de la Tabla II. El hecho de que el método tradicional considere todos los 18 componentes en lugar de reducir el sistema HPCS a cinco subsistemas explica por qué el Análisis de Markov completo, considerando fallas reveladas, es optimista comparado con métodos tradicionales.

Otra propuesta para calcular la indisponibilidad del sistema HPCS, considerando fallas reveladas, es la que en este trabajo se refiere como *Análisis de Markov Truncado*. El resultado de este cálculo es también optimista si se compara con el Análisis de Markov completo. La diferencia entre ambos valores (casos 1 y 3 de la Tabla II) es menor de 0.85%. Esta nueva aproximación funcionó muy bien y el análisis, que requiere el uso de sólo 36 coeficientes de la matriz de transición comparado con los 1024 del Análisis de Markov completo, representó una enorme simplificación. La indisponibilidad es optimista debido a que los estados con dos o más componentes fallados se eliminaron del análisis. Sin embargo, se ha demostrado a través de los

cálculos realizados que la indisponibilidad del sistema se concentra en los primeros seis estados que se proponen por el *Análisis de Markov Truncado*.

Una vez que se realizó el *Análisis de Markov Truncado* considerando cinco subsistemas, el cual resulta de la división del sistema HPCS, el siguiente paso fue realizar un *Análisis de Markov Truncado* considerando todos los componentes del sistema. Se construyó para este propósito una matriz de transición con 361 coeficientes para los 18 componentes que conforman el sistema HPCS, i.e. se consideraron 19 estados, un estado con todos los componentes operando y 18 estados que contenían una falla cada uno (caso 4 de la Tabla II). El resultado de esta propuesta no puede compararse de forma directa con los Análisis de Markov previos (casos 1, 2 y 3 de la Tabla II los cuales consideraron cinco subsistemas). Sin embargo, puede compararse con el método tradicional (caso 5, el cual consideró los 18 componentes). La diferencia entre los valores de indisponibilidad obtenidos con el *Análisis de Markov Truncado* y el método tradicional considerando 18 componentes es de solamente 1.41%, de nueva cuenta validando la precisión de la aproximación del *Análisis de Markov Truncado* para el sistema HPCS considerando fallas reveladas.

Para resolver el problema de determinar los intervalos de inspección del sistema HPCS se construyó un nuevo modelo de Markov. La idea de tener más de dos estados de los componentes (i.e. operando o fallado) ha sido empleada por Vesely [10] y Papazoglou [11]. El nuevo modelo que se propone en este trabajo considera tres estados para cada componente: estado operacional, estado con falla oculta y estado con falla revelada. Este modelo permitió que se tomaran en cuenta diferentes tasas de falla, reparación, así como diferentes tiempos de inspección para cada componente del sistema HPCS. Por lo tanto, se consideraron en el análisis las fallas ocultas, i.e. fallas que no se detectan al momento en que ocurren. Adicionalmente, se propuso un nuevo parámetro denominado tasa de detección ( $\omega$ ) asumiendo que los componentes tienen una tasa de falla y reparación constante y que toma en cuenta los tiempos de inspección de cada componente. La indisponibilidad del sistema bajo estas nuevas condiciones se incrementa en 5.48 veces con respecto al valor que se obtuvo por el Análisis de Markov completo que considera sólo fallas reveladas. El valor que se obtuvo con este modelo es más realista; las fallas en un sistema en reserva no se detectan al tiempo en que ocurren en la práctica. Las fallas se detectan al momento en que se demanda la operación del sistema o cuando se realiza una prueba de la operación del sistema. El sistema HPCS, el cual es un sistema en reserva, podría presentar fallas que no se detectan hasta que se realiza una inspección de sus componentes.

En lo que se refiere a la determinación de los intervalos de inspección del sistema HPCS se tiene lo siguiente. El objetivo fue aumentar la disponibilidad del sistema sin violar los intervalos de inspección que ya están definidos por las especificaciones técnicas de operación de la CLV. Estos intervalos de inspección para reactores tipo BWR se reportan en el documento NUREG-1482 [2] haciendo referencia al código ASME. Los intervalos de inspección propuestos en este trabajo permiten disminuir la indisponibilidad del sistema en alrededor de 16.42%. Este valor debe verse con cuidado ya que adicionalmente deben tomarse en cuenta factores tales como los costos de inspección y un posible incremento en la exposición del personal a la radiación.

Existe controversia, relacionada con los intervalos de inspección, entre la experiencia operacional y las especificaciones técnicas de operación en centrales nucleares. Recientemente, Kim [12] llevó a cabo un estudio donde la experiencia operacional sugiere que algunas pruebas podrían

tener un efecto adverso en la seguridad, y este efecto se agrava con la gran cantidad de pruebas que se requieren por las especificaciones técnicas de operación. Los intervalos propuestos en este trabajo podrían de alguna manera representar una carga adicional al personal de la planta. Sin embargo, el resultado es una reducción en la indisponibilidad del sistema HPCS sin violar la regulación de intervalos de inspección impuesta por el código ASME.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un nuevo modelo basado en la teoría de análisis de Markov para predecir los intervalos de inspección del sistema HPCS de la CLV. Se proponen nuevos intervalos de inspección para componentes específicos de este sistema. Los intervalos son consistentes con las regulaciones impuestas por el código ASME relacionadas con el tiempo máximo permitido para inspeccionar componentes en centrales nucleares. De aplicarse los intervalos de inspección propuestos en este trabajo, la reducción en la indisponibilidad del sistema HPCS es de 16.42%.

La modificación del método de Markov, denominada *Análisis de Markov Truncado*, ha demostrado ser una poderosa aproximación para resolver el inmanejable número de estados de Markov de sistemas complejos como los que se presentan en centrales nucleares. En particular, el uso de esta nueva aproximación permitió considerar todos los componentes que integran el sistema HPCS de la CLV con gran precisión en los valores de indisponibilidad obtenidos.

## REFERENCIAS

1. Clarotti, C. A., Contini, S., Somma, R., Repairable Multiphase System - Markov and Fault Tree Approaches for Reliability Evaluation, in *Synthesis and Analysis Methods for Safety and Reliability Studies*, ed. G. Apostolakis et al., Plenum Press, New York, pp. 45-58, (1980).
2. US Nuclear Regulatory Commission, *Guidelines for Inservice Testing at Nuclear Power Plants*, NUREG-1482, (1995).
3. Comisión Federal de Electricidad, et. al, *Análisis Probabilístico de Seguridad de la Central Laguna Verde*, (1989).
4. Lewis, E. E., *Introduction to Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., (1987).
5. Beasley, M., *Reliability for Engineers*, Macmillan Education, Ltd., (1991).
6. Rea Soto, R., *Predicting Inspection Intervals for an ECCS of a BWR using Markov Analysis*, MSc. Dissertation, Heriot-Watt University, Edinburgh, (1998).
7. Blin, A., Carnino, A., Georgin, J. P., Signoret, J. P., Use of Markov Processes for Reliability Problems, *Synthesis and Analysis Methods for Safety and Reliability Studies*, ed. G. Apostolakis et al., Plenum Press, New York, pp. 269-294, (1980).
8. Schwarzblat, M., Arellano, J., A New Method for the Steady-state Solution of Complex Markov Systems, *Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems*, ed. Samy G. Krishnasamy, Proceedings of the First International Symposium, Pergamon Press, Toronto, Canada, pp. 625-631, (1986).
9. Henley, E. J., Kumamoto, H., *Reliability Engineering and Risk Assessment*, Prentice-Hall, Inc., (1981).
10. Vesely, W. E., Quantifying maintenance effects on unavailability and risk using Markov modelling, *Reliability Engineering and System Safety*, **41**, pp. 177-187 (1993).

11. Papazoglou, I. A., Gyftopoulos, E. P., Markov Processes for Reliability Analyses of Large Systems, *IEEE Trans. Reliability*, **R-26** (3), pp. 232-237 (1977).
12. Kim, I. S., Martorell, S. A., Vesely, W. E., Samanta, P. K., Risk analysis of surveillance requirements including their adverse effects, *Reliability Engineering and System Safety*, **45**, pp. 225-234 (1994).