

# Aplicación del Análisis Probabilístico de Seguridad en el diseño de una planta productora de hidrógeno

Teresa Ruiz-Sánchez<sup>a\*</sup>, Juan Luis Francois<sup>b</sup>, Pamela F. Nelson<sup>b</sup> y M. Javier Cruz-Gómez<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Energías Renovables, UNAM, Privada Xochicalco, C.P. 62580, Temixco, Morelos.

<sup>b</sup>Departamento de Sistemas Energéticos, Facultad de Ingeniería, UNAM, Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México.

<sup>c</sup>Facultad de Química, UNAM, Av. Universitaria No. 3000, Col. Copilco Universidad, Del. Coyoacán, C.P. 04360, México, D.F.

\*truizsmx@yahoo.com.mx

Recibido 30 de Agosto de 2013, Aceptado 09 de octubre de 2013

## Resumen

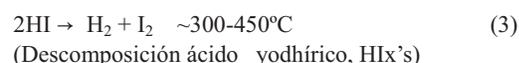
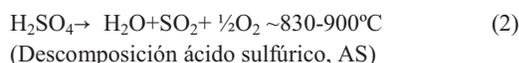
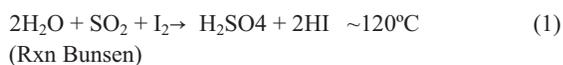
Uno de los procesos que ha sido ampliamente investigado para la producción de hidrógeno, es el ciclo termoquímico Azufre-Yodo (S-I). Debido que, para esta tecnología, se utiliza un gran inventario de materiales tóxicos así como una alta temperatura en el proceso (obtenida por el acoplamiento de un reactor nuclear de alta temperatura) deben considerarse los sistemas de emergencia que se requieren para proteger las instalaciones, el ambiente y a la población. Dado el impacto que tendría una liberación accidental de los materiales del proceso y la cercanía con la planta nuclear es necesario que estos sistemas de emergencia sean lo más confiables posible. Así, los resultados del análisis de consecuencias son utilizados tanto, para la localización óptima de los sensores de gas que activan los sistemas de emergencia como, para la determinación de los flujos de las sustancias que se emplean para el control de la fuga. Por lo anterior, la metodología de Análisis Probabilístico de Seguridad (APS) y algunos estándares de la industria nuclear pueden ser aplicados a la instalación química para determinar las secuencias de falla que conllevan a estados finales de fuga no controlada. De esta manera, con base en los resultados obtenidos por el empleo de las técnicas de Análisis de Árboles de Eventos y Árboles de Fallas, se muestran los componentes más contribuyentes para la falla de dichos sistemas. Asimismo, en este trabajo se plantean algunas propuestas para incrementar la confiabilidad de los sistemas de emergencia. Adicionalmente, se presentan los resultados de las evaluaciones de estas propuestas, y su impacto en la probabilidad de las secuencias de fugas no controladas en una planta química que aún se encuentra la fase de diseño.

**Palabras clave:** Ciclo S-I, sistemas de emergencia, producción de hidrógeno, análisis probabilístico de seguridad, confiabilidad de sistemas.

## 1. Introducción

Desde finales del siglo pasado, una de las principales problemáticas mundiales a la cual nos enfrentamos es la energética. Los combustibles fósiles, que han sido hasta la actualidad la principal fuente de energía, presentan una perspectiva nada favorable para la continuidad de su uso, esto puede observarse en la relación de reservas y su duración con la creciente demanda, así como el impacto al medio ambiente al generar dióxido de carbono. Por ello, es necesario contar con nuevas formas para generar energía que sean eficientes pero sobre todo que contemplen los impactos ambientales en su proceso. Así, se prevé que el hidrógeno (H<sub>2</sub>) sea el elemento que pueda cubrir esta necesidad.

Actualmente, uno de los procesos que, teóricamente, ha demostrado ser uno de los más eficientes para la producción de hidrógeno es el ciclo termoquímico Azufre-Yodo (S-I) acoplado a un reactor nuclear de muy alta temperatura (VHTR por sus siglas en inglés) [1]. El ciclo S-I consiste de las siguientes tres reacciones principales reportadas por General Atomic's [2]:



Como puede observarse en las ecuaciones (1) a (3) la mayoría de las sustancias involucradas en el ciclo S-I son consideradas como peligrosas así es requerido un análisis de consecuencias para determinar los efectos que se tendría por la liberación de estas sustancias en los equipos e instalaciones, el ambiente y la población cercana. Para las simulaciones del análisis de consecuencias se utilizó el programa de cómputo *Phast* ver. 6.1 [3], el cual es ampliamente usado en la industria química.

Los resultados obtenidos en dicho análisis fueron presentados en un trabajo previo en esta revista [4] y un informe más extenso de éstos pueden obtenerse en la *International Journal of Hydrogen Energy* [5]. Así con base en los resultados de las simulaciones se definió la localización óptima de los sensores de gas. Asimismo, se

determinaron los flujos máximos que se liberan ante una falla catastrófica y sus condiciones (concentraciones, temperatura, etc.). Cabe mencionar que los resultados del análisis de consecuencias son representativos de las condiciones climatológicas del Golfo de México.

## 2. Sistemas de emergencia.

Las características y especificaciones preliminares del diseño de los sistemas de emergencia se encuentran reportadas en el trabajo previo en esta revista [4]. No obstante, en esta sección se presentan los esquemas simplificados, así como sus descripciones respectivas, con la finalidad de tener un mejor entendimiento de los modelos que se muestran posteriormente.

Cabe resaltar que la propuesta de sistemas de emergencia tiene como alcance el control de las liberaciones de materiales tóxicos (compuestos y de yodo) de una planta cuyo proceso aún se encuentra en investigación. Por lo anterior, al no contar con una distribución de planta definitiva se establece que el número de sensores se defina, posteriormente, en función de equipos principales (reactores, separadores e intercambiadores de calor) así como la longitud de las tuberías que los conectan.

### 2.1. Sistema propuesto para el control de la liberación de compuestos de yodo.

El sistema propuesto está comprendido básicamente por el tanque de almacenamiento de agua, una bomba "A" (que cuenta con una bomba de reserva, una bomba que será arrancada con la señal combinada de presencia de yodo (monitoreada por el sensor, concentración de 6 ppm) con baja presión en el equipo/sección de tubería más cercano al orificio de fuga. Las tuberías del sistema de aspersión serán seccionadas por tramo de tubería, de la longitud determinada por el ancho de la nube, de acuerdo a simulaciones con *Phast*. Adicionalmente, cada equipo tendrá una sección de aspersión. La ubicación del sensor de yodo que detecta la presencia de este enviará también una señal de apertura a la válvula solenoide correspondiente a la sección de tubería de aspersión para que se dirija sólo a esta área el flujo de agua. El esquema simplificado de este sistema se muestra en la Figura 1.

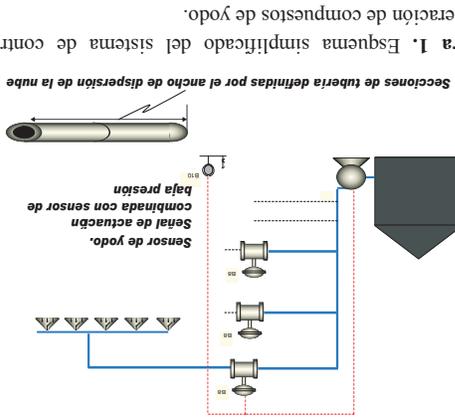


Figura 1. Esquema simplificado del sistema de control de liberación de compuestos de yodo.

### 3. Análisis probabilístico de seguridad (APS).

El APS es un método para identificar las secuencias de accidente dominantes específicas de una instalación nuclear y evaluar su frecuencia de ocurrencia o su probabilidad. Desde sus inicios, en la década de los 70's, esta metodología ha sido ampliamente aceptada en la industria nuclear, ya que permite identificar los elementos que más contribuyen al riesgo en la operación de la central. Sus principales características en la evaluación son: se analizan condiciones que exceden las condiciones de diseño, y se da crédito a sistemas no relacionados con seguridad y a acciones del operador.

Para ello, esta metodología se divide en tres niveles donde el alcance del Nivel I del APS consiste en desarrollar las secuencias de accidente hasta el punto donde se pierde la integridad del núcleo del reactor.

Figura 2. Esquema simplificado del sistema de control de liberación de compuestos sulfurados.

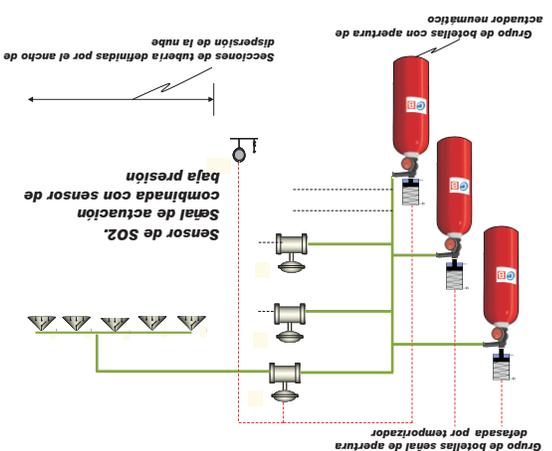


Figura 2. Esquema simplificado de este sistema se muestra en la

esquema simplificado de este sistema se muestra en la Figura 2. El sistema propuesto está comprendido básicamente por grupos de botellas extintoras con bicarbonato de sodio, que serán abietas con la señal combinada de sensor, concentración de 9 ppm), con baja presión en el equipo/sección de tubería más cercano al orificio de fuga. Las botellas contarán con un actuador neumático, y los grupos de botellas que abrirán después del primer minuto contarán con un temporizador para su apertura. Las tuberías del sistema de aspersión serán seccionadas por tramo de tubería, de la longitud determinada por el ancho de la nube, de acuerdo a simulaciones con *Phast*. Adicionalmente, cada equipo tendrá una sección en el sistema de aspersión. La ubicación del sensor de dióxido de azufre que detecta la presencia de este enviará también una señal de apertura a la válvula solenoide correspondiente a la sección de tubería de aspersión, así como al sistema de inyección de agua, para que se dirija sólo a esta área el flujo de bicarbonato y agua. El esquema simplificado de este sistema se muestra en la

### 2.2. Sistema propuesto para el control de la liberación de compuestos sulfurados.

Mientras que los niveles 2 y 3 incluyen el proceso de degradación del núcleo, el comportamiento de la contención y los efectos externos de las posibles liberaciones radioactivas.

Como puede observarse en la Figura 3, la metodología de un Nivel 1 del APS se basa en dos tipos de diagramas lógicos:

- Árboles de Eventos: para determinar las posibles secuencias de accidente
- Árboles de Fallas: para obtener la probabilidad de fallas de sistemas

Una vez construidos los árboles de fallas se combinan y resuelven de manera conjunta con el árbol de eventos, obteniéndose las combinaciones de eventos básicos, llamados conjuntos mínimos de corte (CMC). Así, con las secuencias de accidente expresadas en términos de

eventos básicos, es posible realizar la cuantificación probabilística. La reducción de árboles de fallas a CMC y la evaluación probabilística de cada secuencia de accidente se hace por medio de programas de cómputo.

De esta forma pueden obtenerse los siguientes resultados:

- Secuencias de accidente dominantes. Sucesión de fallas y éxitos de sistemas/ componentes, así como acciones del operador que se presentan después del evento iniciador, y que tienen una contribución significativa a la probabilidad de fundición del núcleo.
- Eventos básicos más contribuyentes. Se obtiene la medida de cuánto contribuye un evento a la seguridad de la planta.

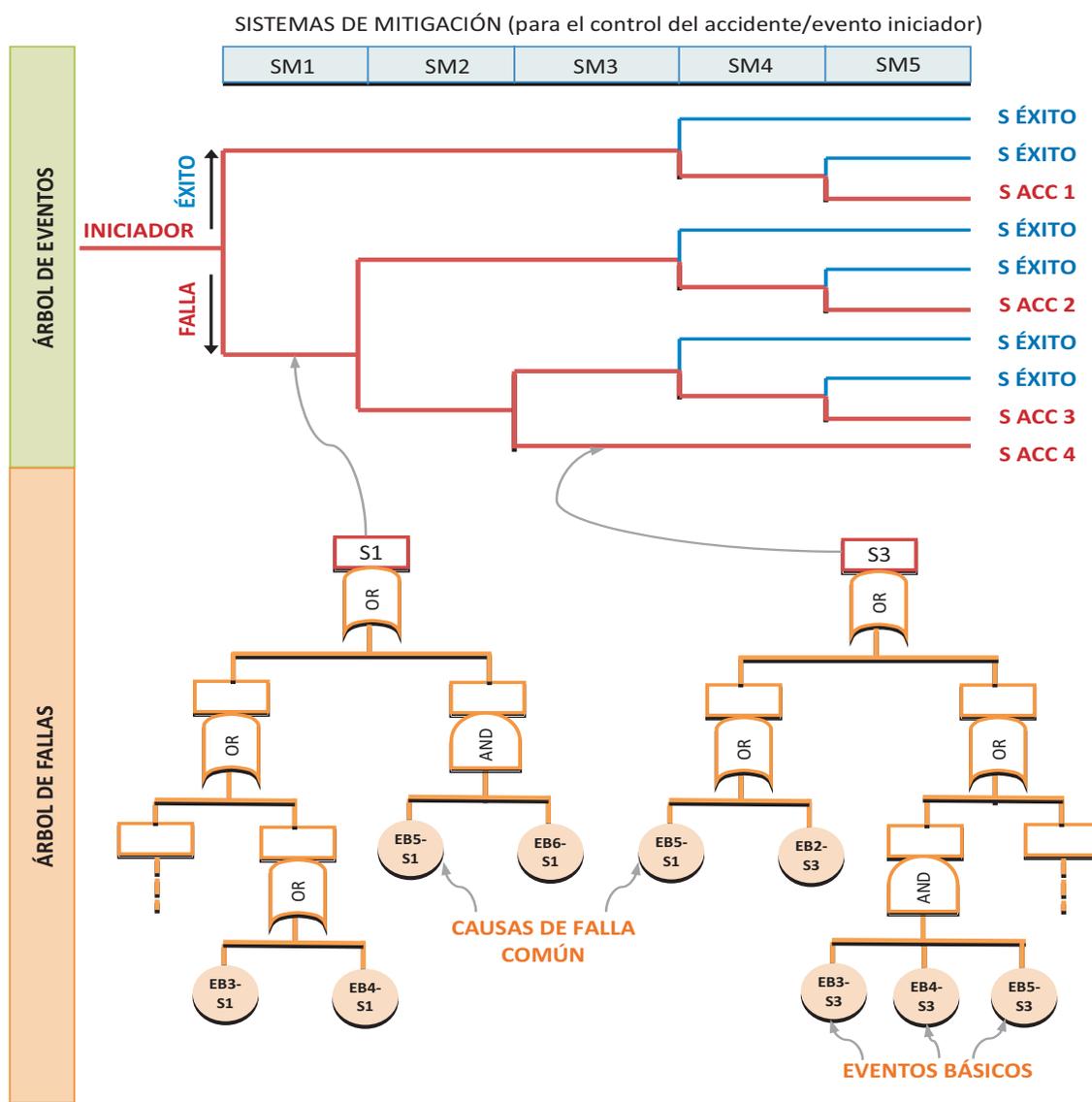


Figura 3. Representación esquemática de los modelos lógicos usados en el APS

### 3.1. Bases para el Desarrollo del APS de la Planta Productora de H<sub>2</sub>

De acuerdo con la metodología de APS, inicialmente fueron desarrollados los árboles de eventos necesarios para representar la secuencia de accidente, tanto para la falla catastrófica como para la fuga probable, de acuerdo con la configuración de los sistemas propuestos (ver sección 2). Asimismo, posteriormente se desarrollaron los árboles de fallas requeridos para evaluar las fallas de los sistemas de mitigación representados en los árboles de eventos. Por ello, para la evaluación cuantitativa de los modelos, realizada en este trabajo usando el programa de cómputo *Saphire* ver. 6.7 [6], fue necesario asignar las probabilidades de falla de los eventos básicos.

Las tasas de falla de componentes para la asignación de las probabilidades de falla se obtuvieron de la referencia del *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE) [7], ya que ésta es aplicable a la industria química. Este documento también se tomó como referencia para asignar la frecuencia de ocurrencia del evento iniciador “falla de la tubería”, así para una fuga de 2.54 cm la frecuencia es de 5.7E-7/h (pag. 184) y para la falla catastrófica la frecuencia es de 2.68E-8/h (pag. 163). Adicionalmente, se incluyeron la indisponibilidad por mantenimiento tanto del tanque de almacenamiento como de la bomba de reserva.

Otras de las consideraciones para la asignación de probabilidades fueron:

- Período de calibración/pruebas de los sensores y temporizador: cada 6 meses
- Tiempo de mantenimiento de las bombas: cada 6 meses
- Tiempo de supervisión del tanque de almacenamiento de agua: cada año
- Tiempo para reparación del tanque de almacenamiento de agua: una semana
- Período de pruebas de la válvula de aire de instrumentos: cada año.

Así, se evaluaron las distintas secuencias de los árboles de eventos que tienen como estado final “fuga no controlada”. En estos modelos se definieron el evento iniciador (en este caso ruptura de la tubería) y la secuencia de respuesta del equipo y acciones humanas en orden cronológico.

A continuación se detallan las consideraciones que se tomaron como base para el desarrollo de los modelos de los sistemas propuestos:

- Para el sistema de emergencia propuesto para el control de fugas de compuestos de yodo, la secuencia de las respuestas (sistemas de mitigación) quedó definida, por su temporalidad, de la siguiente forma (ver Figura 4):
- Actuación correcta de los sensores (presión y gas)
- Apertura de la válvula solenoide de la sección correspondiente
- Actuación del bombeo de agua
- Suministro (almacenamiento) de agua.

- Por otro lado, para el sistema de emergencia propuesto para compuestos sulfurados, los árboles de eventos desarrollados (ver Figura 6) tienen la misma secuencia que los modelos propuestos para los compuestos de yodo: primero la actuación de los sensores y luego los componentes agrupados en el sistema de aspersión de agua. Sin embargo, a este árbol se le adiciona la actuación del sistema de aspersión de bicarbonato (componentes: válvula solenoide de seccionamiento, temporizador y válvulas de actuación de las botellas extintoras).

### 3.2. Evaluación de modelos del sistema de emergencia de compuestos de yodo.

En la Figura 4 se muestra el árbol de eventos desarrollado para el control de la fuga de compuestos de yodo para cualquier caso de falla de tubería (catastrófica o probable). Asimismo, en la Figura 5 se muestra el árbol de fallas correspondiente, en el cual puede observarse que si se presenta la falla de cualquiera de los sensores (presión o gas), el estado final es de fuga no controlada.

### 3.3. Evaluación de modelos del sistema de emergencia de compuestos sulfurados.

En la Figura 6 se muestra el árbol de eventos desarrollado para el control de la fuga de compuestos sulfurados para ambos casos de falla. Asimismo, en las Figuras 7 y 8 se muestran los árboles de fallas correspondientes a la falla de los sistemas de aspersión de agua y de bicarbonato, respectivamente. Cabe mencionar que la Figura 7 engloba los tres últimos sistemas de respuesta (mitigación) del árbol de fallas de la fuga de compuestos sulfurados.

Es importante recalcar que en el árbol de fallas del sistema de aspersión de agua (Figura 7) se incluye la indisponibilidad de las bombas por mantenimiento (I-BOMB-A, I-BOMB-B), sin embargo, en la evaluación de los modelos el CMC que considera la indisponibilidad por mantenimiento de ambas bombas es eliminado. Lo anterior dado que, tanto en la industria nuclear como en la química, no está permitido que se realice mantenimiento a bombas que pertenecen al mismo sistema de manera simultánea.

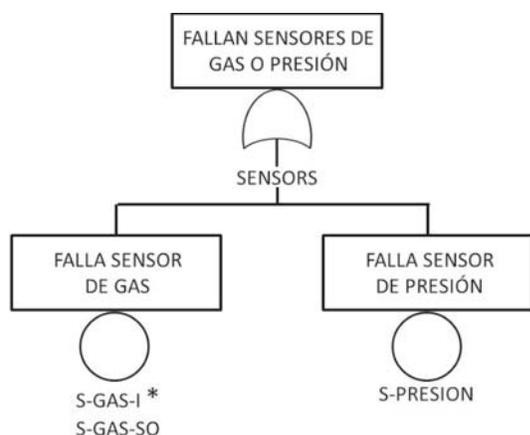
Asimismo, el modelo de falla de los sensores es el mismo que se muestra en la Figura 5, la única diferencia es que para este sistema el sensor de gas que se utiliza es el de SO<sub>2</sub>.

En este árbol de eventos se observa que existen otros dos estados finales adicionales a los que se presentaron en el sistema de control de fuga de compuestos de yodo:

- Fuga con posible daño de equipo (corresponde a la secuencia donde se tuvo éxito sólo en la aspersión de agua) y
- Fuga con impacto ambiental (corresponde a la secuencia donde se tuvo éxito sólo en la aspersión de bicarbonato).

FALLA TUBERÍA	ACTUACIÓN DE SENSORES DE GAS Y PRESIÓN	APERTURA DE VÁLVULA SOLENOIDE	ACTUACIÓN BOMBA	SUMINISTRO DE AGUA	#	NOMBRE DE LA SECUENCIA	ESTADO FINAL
RUPT-TUB	SENSOR	VALV-ABR	BOMBA-H2O	SUM-H2O			
					1	OK	FUGA CONTROLADA
					2	NO-SUM-H2O	FUGA NO CONTROLADA
					3	NO-BOMBA	FUGA NO CONTROLADA
					4	NO-VALV	FUGA NO CONTROLADA
					5	NO-SENSOR	FUGA NO CONTROLADA

Figura 4. Árbol de eventos desarrollado para la evaluación de sistema de emergencia para el control de fugas de compuestos de yodo.



\*S-GAS-I: Falla sensor de yodo para el sistema de emergencia para el control de liberaciones de compuestos de yodo o S-GAS-SO: Falla sensor de dióxido de azufre para el sistema de emergencia para el control de liberaciones de compuestos sulfurados

Figura 5. Modelo para la falla de los sensores de gas y presión

Se considera que el estado final de fuga, con posible daño, podría darse dado que el flujo de agua determinado para el sistema se calculó con un exceso para que se pueda absorber el calor de disolución del ácido sulfúrico; no obstante, se considera que podría provocarse alguna salpicadura al agregar agua al ácido sulfúrico mediante la aspersión. Así, existe la posibilidad de que algo de ácido tenga contacto con alguna tubería o equipo que pueda provocar la reacción del metal, produciendo su daño.

Asimismo, se tiene que el estado final de fuga, con impacto ambiental, puede presentarse dado que el flujo de bicarbonato está calculado con exceso, y se considera que se puede obtener la formación del ión bicarbonato, con la presencia del agua contenida en la humedad del ambiente, aunque sería menor la proporción del ión, por lo cual no se podría neutralizar toda la nube. Por lo anterior, ambos estados finales fueron evaluados como “fuga parcialmente controlada”, como puede verse en la Figura 6.

FALLA TUBERÍA	ACTUACIÓN DE SENSORES DE GAS Y PRESIÓN	SISTEMA DE ASPERSIÓN DE AGUA	SISTEMA DE ASPERSIÓN DE BICARBONATO	#	NOMBRE DE LA SECUENCIA	ESTADO FINAL	
RUPT-TUB	SENSOR	S-H2O	S-NaHCO3				
					1	OK	FUGA NO CONTROLADA
					2	FUGA C/DAÑO EQUIPO	FUGA PARCIALMENTE CONTROLADA
					3	FUGA C/IMPACTO AMBIENTAL	FUGA PARCIALMENTE CONTROLADA
					4	NO-SISTEMAS	FUGA NO CONTROLADA
					5	NO-SENSOR	FUGA NO CONTROLADA

Figura 6. Árbol de eventos desarrollado para la evaluación de sistema de emergencia para el control de fugas de compuestos sulfurados.

#### 4. Resultados.

Los resultados de las evaluaciones de los modelos se muestran en la Tabla I. Aquí se muestran: la frecuencia de ocurrencia tanto para la falla catastrófica como para la fuga probable (2.54 cm de diámetro), dada la diferencia en el evento iniciador; la probabilidad condicional (dado que el evento iniciador ocurrió, es decir, se le asignó la probabilidad de uno), y los CMC, el número total de combinaciones obtenidas y los cinco que tienen una mayor contribución, así como sus componentes. En esta tabla puede observarse que, como ya se mencionó anteriormente, sólo la evaluación de los modelos de fuga de compuestos sulfurados contiene secuencias de fuga parcialmente controlada.

En la Tabla I se observa que, para ambos sistemas, más del 85% de las veces que ocurra un evento de fuga puede tenerse como resultado estado final de fuga no controlada. Asimismo, el CMC más contribuyente es de orden uno, siendo el S-GAS su componente. Adicionalmente, se observa que el estado final de fuga no controlada se presenta una probabilidad condicional de 20.44%.

Así, considerando estos resultados se hicieron las siguientes propuestas para mejora de los sistemas:

1. Una redundancia del sensor de gas y disminuir el tiempo de calibración de sensores de 6 a 3 meses.
2. Modificar la confiabilidad de los componentes a calidad nuclear utilizando las tasas de falla (medias)

reportadas en el IAEA-TECDOC-508 [8]. Las tasas de falla remplazadas son:

- Bomba (tasa de falla a la demanda del AICHe 1.08E-2, IAEA 8.1E-03)
- Válvula solenoide (tasa de falla a la demanda del AICHe 2.83E-3, IAEA 1E-03)
- Temporizador (interruptor, tasa de falla del AICHe 49.6E-06/h, IAEA 8.6E-06/h)

#### 4.1 Evaluación de las propuestas de mejora.

Los resultados de las evaluaciones de las propuestas de mejora se muestran en la Tabla II. Cabe mencionar que para esta evaluación sólo se muestran los CMC obtenidos con la propuesta 1 ya que éstos varían en la composición de los componentes.

Con estos resultados puede observarse que aplicando la propuesta de mejora 1 se reduce a la mitad la probabilidad de falla del sistema de emergencia, sin embargo, el CMC más contribuyente se vuelve de orden dos. Por otro lado, se aprecia que la probabilidad de ocurrencia de las secuencias de fuga no controlada, obtenida con la sustitución de equipo más confiable (calidad nuclear), es similar a la obtenida con la propuesta de colocar redundancia de los sensores de gas. Así, para determinar qué propuesta es más viable, se recomienda realizar un análisis de costos.

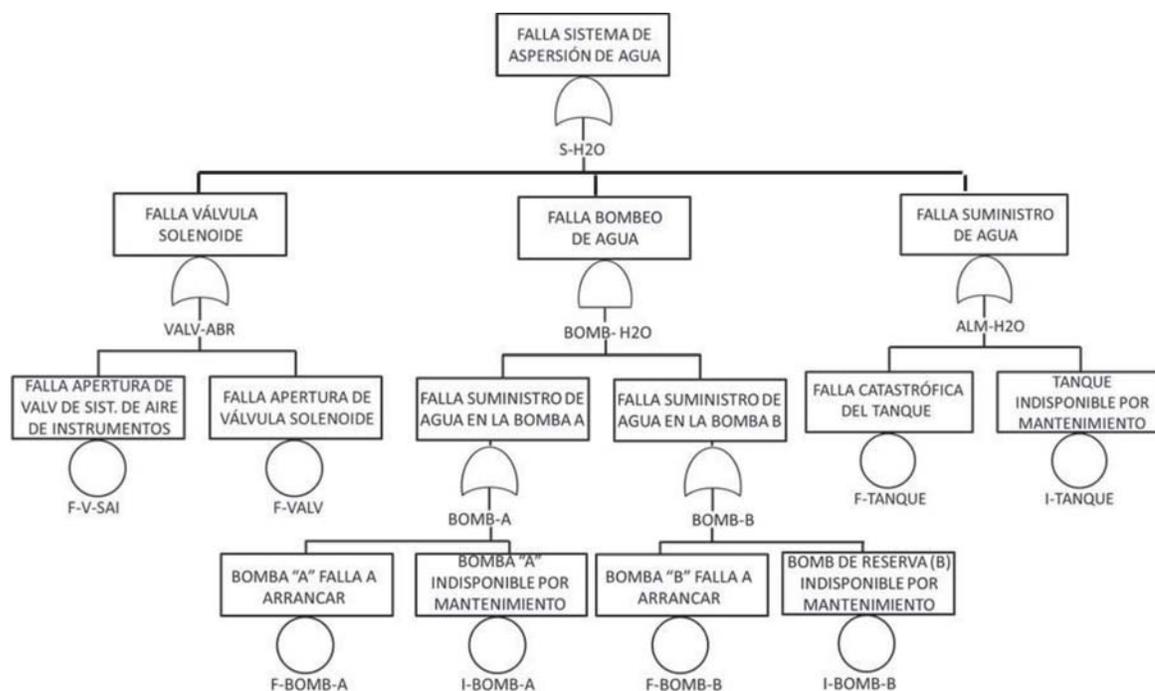


Figura 7. Modelo para la falla del sistema de aspersión de agua

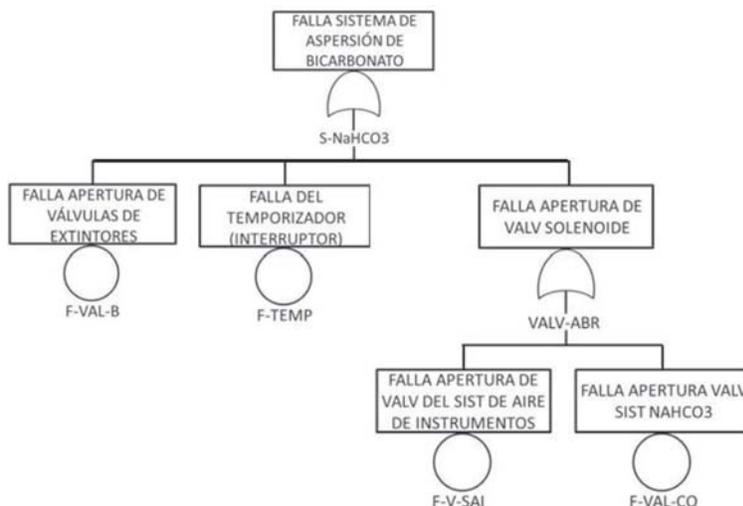


Figura 8. Modelo para la falla del sistema de aspersión de bicarbonato

Tabla 1. Resultados de la evaluación de los sistemas de emergencia (secuencias de fuga no controlada y parcialmente controlada)

	Sistema para control de fugas compuestos de yodo		Sistema para control de fugas compuestos sulfurados	
	Falla catastrófica	Fuga probable	Falla catastrófica	Fuga probable
Frecuencia de ocurrencia –Fuga no controlada	2.302E-08/h (2.02E-04/año)	4.895E-07/h (4.29E-03/año)	1.512E-08/h (1.32E-04/año)	3.215E-07/h (2.81E-03/año)
Probabilidad condicional –Fuga no controlada	8.588E-01		5.641E-01	
CMC (total) contribución/ componente(s)	CMC (8) 97.04% S-GAS 1.83% S-PRESION 0.62% I-TANQUE 0.16% F-VALV 0.00% F-TANQUE		CMC (16) 91.04% S-GAS 3.61% F-V-SAI 2.23% S-PRESION 0.09% I-TANQUE, S-TEMP 0.06% F-VALV, S-TEMP	
Frecuencia de ocurrencia –Fuga parcialmente controlada			5.478E-09/h (4.80E-05/año)	1.165E-07/h (1.02E-03/año)
Probabilidad condicional –Fuga parcialmente controlada			2.044E-01	
CMC (total) contribución			CMC (8) 96.19% S-TEMP 1.89% I-TANQUE 1.39% F-VAL-CO 1.39% F-VALV 0.06% F-VALV-B	

Tabla 2. Resultados de la evaluación de las propuestas de mejora a los sistemas de emergencia (secuencias de fuga no controlada y parcialmente controlada)

	Sistema para control de fugas compuestos de yodo		Sistema para control de fugas compuestos sulfurados	
	Propuesta de mejora 1	Propuesta de mejora 2	Propuesta de mejora 1	Propuesta de mejora 2
Probabilidad condicional –Fuga no controlada	4.602E-01	4.588E-01	29.2E-01	29.1E-01
CMC (total) contribución/ componente(s) –Propuesta 1	CMC (8) 97.07% S-GAS, S-GASR* 1.75% S-PRESION 1.0% I-TANQUE 0.26% F-VALV		CMC (16) 96.19% S-GAS, S-GASR* 1.01% F-V-SAI 0.83% S-PRESION 0.19% I-TANQUE, S-TEMP	

\* FALLA SENSOR DE GAS REDUNDANTE.

## 5. Conclusiones

Los sistemas de emergencia propuestos no incrementan el inventario de sustancias peligrosas incluidas en el proceso, debido a que se utiliza agua y bicarbonato de sodio. Para el inventario de estas nuevas sustancias debe considerarse el flujo másico liberado durante diez minutos en una falla catastrófica, por lo cual, cualquier liberación menor de las sustancias tóxicas estará completamente neutralizada mediante la actuación de los sistemas de emergencia. Asimismo, a pesar de que la liberación de compuestos sulfurados se presente a altas temperaturas, que provoquen la descomposición del bicarbonato, el carbonato que se produce es capaz de neutralizar a esta mezcla.

Las secuencias de fuga no controlada presentan una frecuencia de ocurrencia en el rango dentro de la frecuencia del evento iniciador ( $1.0E-03/\text{año}$ –  $1.0E-04/\text{año}$ ). Por ello, se evaluaron algunas propuestas de mejora, encontrándose que la incorporación de la redundancia de sensores de gas, y su reducción en el tiempo de calibración o el cambio de equipo a calidad nuclear, reduce a aproximadamente a la mitad la probabilidad de dichas secuencias. Otra de las modificaciones viables, y no evaluadas, es la recuperación de las funciones de mitigación mediante la incorporación de acciones humanas. Para ello, tendría que evaluarse la dispersión de la nube en función de la distancia y tiempo, y definir a qué funciones podría darse crédito.

Así, para la evaluación de la mejor propuesta, deberá hacerse un análisis de costo beneficio. Para ello, será necesario determinar el diseño final, tanto de los sistemas de emergencia como de proceso (y costo de la adición de las mejoras), así como definir los resultados del análisis de consecuencias como una función económica (costos de pérdidas de producción, de equipo y personas, así como multas por impacto ambiental).

Cabe recalcar que cualquier descontrol importante en la planta química (variaciones en temperatura, presión y flujo de proceso) enviará la señal de paro del reactor nuclear y viceversa.

## 6. Agradecimientos

Se hace un agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de doctorado otorgada a T. Ruiz-Sánchez, con la cual se hizo posible este trabajo. Adicionalmente, se agradece a la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo brindado a través del proyecto de investigación PAPIIT IN106310.

## 7. Referencias

1. Brown, L. C.; Funk, J. F.; Pickard, P.; Marshall, A.; Showalter, S. K. High efficiency generation of hydrogen fuels using nuclear power – Final Technical Report, General Atomics Report GA-A24285, Rev. 01, December 2003.
2. Muradov, N. Z.; Veziroglu, T. N. Int. J. Hydrogen Energy, **2008**, 33, 6804-6839.
3. Phast 6.1 Professional, Process Hazard Analysis Software Tool, Norway: DNV, 1999.

4. Ruiz-Sánchez T.; Nelson, P. F.; Francois, J. L., Cruz-Gómez, M. J. REvista Química Hoy, (Aplicación del Análisis de Consecuencias en la Propuesta de Sistemas de Emergencia para una Planta Productora de Hidrógeno-artículo en proceso de publicación)
5. Ruiz-Sánchez T.; Nelson, P. F.; Francois, J. L., Cruz-Gómez, M. J. Int. J. Hydrogen Energy, **2012**, 37, 6965 - 6975.
6. Idaho National Laboratory. <https://saphire.inl.gov/> (accesado el 03 de marzo de 2013).
7. American Institute of Chemical Engineers (AIChE), *Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables*. Center for Chemical Process Safety (CCPS), 1989, pp.127-212.
8. IAEA, *Survey of Ranges of Component Reliability Data for Use In Probabilistic Safety Assessment*, IAEA-TEDOC-508, Viena, 1989, pp 181-234.