



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

## ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD DE UNA PLANTA DE REFORMADO DE METANO CON VAPOR ACOPLADA A UN REACTOR NUCLEAR DE ALTA TEMPERATURA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROGENO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA  
ALAIN FLORES Y FLORES

DIRECTOR DE TESIS  
DR. JUAN LUIS FRANCOIS LACOUTURE



CIUDAD UNIVERSITARIA MÉXICO, D.F. 2005



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS.**

Quiero dedicar esta tesis a mis padres por apoyarme en seguir mis estudios, al Dr. Juan Luis François Lacouture por aceptar ser mi tutor y asesor, por brindarme su confianza, desde que lo conozco presentí esa gran confianza que me tuvo, seguiré adelante y espero no defraudarlo, se que tengo uno que otro defecto que él me ha ayudado a identificar y sugerirme como superarlo, le agradezco mucho Dr. Juan Luis.

A la M. en C. Pamela Nelson Edelstein por tenerme tanta paciencia y dedicarme su tiempo, se que a veces posponía cosas por orientarme o ayudarme y le estoy muy agradecido.

A la Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez por ofrecerme un lugar dentro del laboratorio y poder concluir mi tesis.

A todos mis profesores de la Maestría por transmitirme parte de sus conocimientos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme una beca nacional y de esta manera dedicarme por completo a mis estudios.

A mis amigos Lupita, Julio, José, Jerson, Hermilo y Miguel, con los que conviví en estos dos años.

A mi hermosa novia Martha por brindarme su cariño y soportar mis momentos de desesperación y de presión.

Y a esta universidad por reunir a todas estas personas tan importantes para mí.

## CONTENIDO.

<b>Lista de Figuras.</b>	<b>I</b>
<b>Lista de Tablas.</b>	<b>II</b>
<b>Lista de Acrónimos.</b>	<b>III</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. EL ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD</b>	<b>4</b>
1.1. Técnica HAZOP	4
1.2. Árbol de Eventos.	5
1.3. Árbol de Fallas.	6
1.4. Análisis de Resultados y Pruebas de Sensibilidad.	7
1.5. Incertidumbre en el Análisis de Riesgo.	8
1.5.1. Simulación de Montecarlo.	8
1.6. SAPHIRE	9
<b>Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS DEL HTTR</b>	<b>11</b>
2.1. Edificios Principales del HTTR.	11
2.2. Edificio del Reactor.	12
2.3. Núcleo del HTTR.	12
2.4. Vasija Presurizada del Reactor (RPV).	13
2.5. Principales Consideraciones de Seguridad del HTTR.	14
2.6. Control y Apagado del Reactor.	15
2.7. Remoción del Calor Residual.	16
2.8. Sistema Principal de Refrigeración (MCS).	17
2.9. Sistema Auxiliar de Refrigeración (ACS).	17
2.10. Sistema de Refrigeración de la Vasija (VCS).	17
2.11. Barreras Múltiples para Evitar la Liberación de Productos de Fisión.	18
2.12. Sistema de Barras de Control.	19
<b>Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE REFORMACIÓN DE METANO.</b>	<b>21</b>
3.1. Descripción del Proceso de Reformación de Metano	21
3.2. Balances de Masa y Energía para el Proceso de Reformación de Metano con Vapor	23
3.3. Reformador de Metano.	24
3.4. Acoplamiento de la Planta de Reformación de Metano al HTTR.	27
3.4.1. Mitigación de perturbaciones térmicas al reactor.	28
3.4.2. Variaciones de presión en las paredes de los tubos del reformador.	28
<b>Capítulo 4. ANÁLISIS DE SECUENCIAS DE ACCIDENTE DE LA PLANTA DE REFORMACION DE METANO ACOPLADA AL HTTR.</b>	<b>30</b>
4.1. Aplicación de la Técnica HAZOP.	30
4.2. Ruptura de Tubería de Metano (RU-ME).	33

4.2.1. Ubicación y Descripción de la Falla.	33
4.2.2. Resultados del Análisis para el Evento Iniciador RU-ME.	34
4.3. Ruptura de Línea de Helio (RU-HE), Accidente de Despresurización.	36
4.3.1. Ubicación y Descripción de la Falla.	36
4.3.2. Resultados del Análisis para el Evento Iniciador RU-HE.	37
4.4. Ruptura de un Tubo de Transferencia de Calor Dentro del PPWC (RU-PPWC).	39
4.4.1. Ubicación y Descripción de la Falla.	39
4.4.2. Resultados del Análisis para el Evento Iniciador RU-PPWC.	40
<b>Capítulo 5. RESULTADOS.</b>	<b>42</b>
5.1. Resultados Generales.	42
5.2. Resultados Explosión de Metano.	46
5.3. Resultados Explosión de Hidrógeno.	47
5.4. Resultados de Liberación de Productos de Fisión.	48
<b>Capítulo 6. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.</b>	<b>50</b>
6.1. Explosión de Metano.	50
6.2. Explosión de Hidrógeno.	54
6.3 Liberación de Productos de fisión.	60
<b>Conclusiones.</b>	<b>63</b>
<b>Anexo A. Tasas de Fallas.</b>	<b>66</b>
<b>Anexo B. Árboles de Fallas.</b>	<b>67</b>
<b>Anexo C. Estudio de un Supuesto Incendio de Metano.</b>	<b>71</b>
<b>Referencias</b>	<b>74</b>

### Lista de Figuras.

Figura 1. Árbol de eventos para el evento iniciador.	5
Figura 2. Representación gráfica de las compuertas AND y OR.	6
Figura 3. Representación gráfica del Sistema1.	7
Figura 4. Árbol de fallas del Sistema 1.	7
Figura 5. Pantalla de SAPHIRE en una PC.	10
Figura 6 Principales edificios del la planta.	11
Figura 7. Edificio del reactor.	12
Figura 8. Arreglo horizontal del núcleo.	13
Figura 9. Comparación de los tipos de combustible utilizados por el HTTR y por el reactor Pebble-Bed.	13
Figura 10. Vasija presurizada del reactor.	14
Figura 11. Sistema de refrigeración del HTTR.	15
Figura 12. Principales sistemas de enfriamiento del reactor.	16
Figura 13. Distribución de los paneles del VCS.	18
Figura 14. Principales barreras contra la liberación de productos de fisión.	19
Figura 15. Diseño de la barra de control.	20
Figura 16. Representación modular del proceso de reformación de metano.	21
Figura 17. Esquema gráfico del proceso de reformado.	22
Figura 18. Balance de masas para 1MWh, utilizando el método tradicional de reformado de vapor con metano.	24
Figura 19. Balance de masas para 1MWh, utilizando un reactor nuclear para suministrar la energía requerida para el proceso de reformado de vapor con metano.	24
Figura 20. Descripción de un tubo reformador.	25
Figura 21. Reformador desarrollado por JAERI.	27
Figura 22. Diagrama de tubería e instrumentación de la planta de reformación acoplada al HTTR	29
Figura 23. Ubicación de la falla RU-ME.	33
Figura 24. Árbol de eventos para el evento iniciador RU-ME.	34
Figura 25. Ubicación de la falla RU-HE.	37
Figura 26. Árbol de eventos para el evento iniciador RU-HE.	37
Figura 27. Ubicación de la falla RU-PPWC.	39
Figura 28. Árbol de eventos para el evento iniciador RU-PPWC.	40
Figura 29. Ruta de liberación de productos de fisión.	48
Figura 30. Relación indisponibilidad de la bomba con la frecuencia de ocurrencia de explosión de metano.	52
Figura 31. Configuración sugerida después del análisis.	53
Figura 32. Relación indisponibilidad de inserción de barras de control con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.	56
Figura 33. Relación indisponibilidad del operador con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.	57
Figura 34. Relación indisponibilidad de una válvula de corte del PPWC con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.	58
Figura 35. Relación indisponibilidad de la válvula de corte del PPWC con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.	59
Figura 36. Relación indisponibilidad del recirculador con la frecuencia de ocurrencia de liberación de productos de fisión.	62

Lista de Tablas.

Tabla I. Comparación de datos de un reformador convencional con uno calentado por medio de helio.	25
Tabla II. Aplicación del método HAZOP aplicado por líneas a una planta de reformación de metano con vapor acoplada a un reactor nuclear de alta temperatura.	30
Tabla III. Probabilidad de falla de cada sistema en el evento RU-ME.	35
Tabla IV. Frecuencia de ocurrencia de cada estado final del evento RU-ME.	36
Tabla V. Probabilidad de falla de cada sistema en el evento RU-HE.	38
Tabla VI. Frecuencia de ocurrencia de cada estado final del evento RU-HE.	38
Tabla VII. Probabilidad de falla de cada sistema en el evento RU-PPWC.	40
Tabla VIII. Frecuencia de ocurrencia de cada estado final del evento RU-PPWC.	41
Tabla IX. Probabilidad de falla de cada sistema de todos los eventos.	42
Tabla X. Frecuencia de ocurrencia de cada estado final de todos los eventos.	43
Tabla XI. Frecuencia de ocurrencia de los estados finales con daño a la salud.	44
Tabla XII. Aportación por dispositivo para la ocurrencia de algún estado final con daños a la salud.	45
Tabla XIII. Aportación por evento iniciador para la ocurrencia de algún estado final con daño a la salud.	45
Tabla XIV. Aportación por sistemas para la ocurrencia de algún estado final con daño a la salud.	46
Tabla XV. Frecuencia de ocurrencia del estado final EXPLOSIONM.	47
Tabla XVI. Frecuencia de ocurrencia del estado final EXPLOSIONH2.	47
Tabla XVII. Frecuencia de ocurrencia del estado final FP.	48
Tabla XVIII. Aportación de diferentes dispositivos para dar origen al estado final explosión de metano.	51
Tabla XIX. Relación indisponibilidad de la bomba con la frecuencia de ocurrencia de explosión de metano.	52
Tabla XX. Probabilidad de falla de cada sistema en el evento RU-ME, al incluir una codificación en la configuración del diagrama.	53
Tabla XXI. Frecuencia de explosión de metano después de realizar la modificación.	54
Tabla XXII. Aportación de diferentes dispositivos para dar origen al estado final explosión de hidrógeno.	55
Tabla XXIII. Relación indisponibilidad de inserción de barras de control con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.	56
Tabla XXIV. Relación tasa de falla del operador con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.	57
Tabla XXV. Relación indisponibilidad de una válvula de corte del PPWC con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.	58
Tabla XXVI. Relación indisponibilidad de las válvulas de corte del PPWC con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.	59
Tabla XXVII. Aportación de diferentes dispositivos para dar origen al estado final liberación de productos de fisión.	60
Tabla XXVIII. Frecuencia de ocurrencia del estado final liberación de productos de fisión depuse de la modificación.	61
Tabla XXIX. Relación indisponibilidad del RECIRCULADOR con la frecuencia de ocurrencia de liberación de productos de fisión.	61

Lista de Acrónimos.

<b>ACS</b>	Sistema Auxiliar de Enfriamiento.
<b>AOO</b>	Transitorios Operacionales Esperados.
<b>APS</b>	Análisis Probabilístico de Seguridad.
<b>AXH</b>	Intercambiador Auxiliar de Calor.
<b>CA</b>	Corriente Alterna.
<b>CFP</b>	Partículas de Combustible Revestido.
<b>CR</b>	Barras de Control.
<b>CRDM</b>	Mecanismo Activador de Barras de Control
<b>CV</b>	Contención de la Vasija.
<b>DT</b>	Daño Térmico
<b>DTP</b>	Daño Térmico Parcial
<b>DTQ</b>	Daño Térmico a la Planta Química
<b>EXPLOSIONH2</b>	Explosión debida a acumulación de Hidrógeno
<b>EXPLOSIONM</b>	Explosión debido a acumulación de Metano
<b>FP</b>	Productos de Fisión.
<b>HAZOP</b>	Hazard and Operability Study.
<b>HTTR</b>	Reactor de Prueba de Alta Temperatura.
<b>IHX</b>	Intercambiador de Calor.
<b>INEEL</b>	Laboratorio Nacional de Energía y Ambiente de Idaho
<b>JAERI</b>	Instituto de Investigación de Energía Atómica de Japón
<b>MCS</b>	Sistema Principal de Enfriamiento.
<b>MSR</b>	Sistema de Reformación de Metano
<b>OXGRAF</b>	Oxidación de Grafito
<b>PCS</b>	Sistema Primario de Enfriamiento.
<b>PPWC</b>	Enfriador Primario de Agua Presurizada.
<b>PWCS</b>	Sistema Enfriador de Agua Presurizada
<b>RPV</b>	Vasija Presurizada del Reactor.
<b>RSS</b>	Sistema de Apagado de Reserva.
<b>RU-HE</b>	Evento de Ruptura de la Línea de Helio
<b>RU-ME</b>	Evento de Ruptura de la línea de Metano
<b>RU-PPWC</b>	Evento de Ruptura de un Tubo del Intercambiador de Calor en el PPWC.
<b>SA</b>	Área de Servicio.
<b>SAPPHIRE</b>	Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations.
<b>SCRAM</b>	Apagado Súbito del Reactor.
<b>SHCS</b>	Sistema Secundario Enfriador de Helio.
<b>SPCS</b>	Enfriador Secundario de Agua Presurizada.
<b>VCS</b>	Sistema Enfriador de la Vasija.



## INTRODUCCIÓN.

El incremento de la población mundial, la disminución progresiva de las reservas de combustibles fósiles y los problemas de contaminación ambiental asociados a su combustión, han atraído la atención de los investigadores hacia la búsqueda de nuevas alternativas energéticas. El hidrógeno es una de ellas, pues posee grandes ventajas ambientales. Es un combustible limpio cuando se quema con aire y produce emisiones no contaminantes, excepto para algunas relaciones  $H_2$ /aire donde la temperatura elevada de la llama produce concentraciones significativas de  $NO_x$  en la combustión. Además de la combustión directa, se ha empezado a desarrollar una tecnología basada en celdas de combustibles en las que se transforma la energía química en energía eléctrica y vapor de agua.

Para tener una idea de la magnitud del problema basta, examinar el crecimiento experimentado por el parque automovilístico mundial. Así, mientras la población humana se ha duplicado desde 1950, el número de automóviles se ha multiplicado por siete. En los países más desarrollados la velocidad de crecimiento del parque automovilístico se espera que se estabilice alrededor de 1% por año, aunque la distancia promedio a recorrer aumenta con mayor velocidad (en USA puede alcanzar un 4% por año). A ello se debe añadir el crecimiento explosivo que está experimentando el tráfico rodado en algunos países. Por ejemplo, para el año 2010 en China este crecimiento se estima que aumente noventa veces con respecto al de 1990, mientras que en la India el crecimiento estimado en el mismo período es de 35 veces. Como promedio, el parque de automóviles se duplicará en los próximos 20 años [1].

La cuestión inmediata que se plantea es cómo se pueden mitigar los efectos contaminantes resultantes del incremento progresivo del tráfico rodado. Las emisiones en los gases de escape de los motores, tales como hidrocarburos no quemados (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) son las responsables de problemas de contaminación localizados. En los últimos años los constructores de automóviles han ido incorporando convertidores catalíticos post-combustión con el objetivo de reducir las emisiones contaminantes localizadas. Estos dispositivos catalíticos, denominados de tres vías (TWC, "three way catalysts") son muy eficientes en cuanto que eliminan 90-95% de las emisiones CO,  $NO_x$  y HC [2].

La emisión más importante es el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), se espera incidir sobre ella a mediano plazo, debido a su implicación en el efecto invernadero global en la atmósfera, implicado en el cambio climático. La forma más simple de reducir las emisiones de  $CO_2$  producidas por el tráfico rodado es aumentar la eficiencia de los motores desde sus niveles actuales de 12-15%, mediante la mejora de los diseños de los motores de combustión y la estructura del propio vehículo. Además, está surgiendo con fuerza una tecnología alternativa, basada en un motor eléctrico alimentado por una pila o celda de combustible. Este concepto nuevo ofrece ventajas sustanciales sobre la tecnología clásica de combustión, no solamente por el aumento de la eficiencia hasta niveles de 30-40% sino también por que la única emisión producida es vapor de agua.

El hidrógeno es un portador de energía como la electricidad y puede producirse a partir de una amplia variedad de fuentes de energía tales como: el gas

natural, el carbón, la biomasa, el agua, etc., así como de las aguas negras, de los residuos sólidos, llantas y desechos de petróleo.

Actualmente la forma más utilizada debido a su eficiencia y al costo de producción es la de reformación de metano, en el Instituto de Investigación de Energía Atómica de Japón (JAERI) actualmente se está construyendo una planta productora de hidrógeno, la cual utiliza el método de reformación de metano y la fuente de energía térmica es suministrada por un reactor de prueba de alta temperatura (HTTR). Se cuentan con la descripción de sistemas y dispositivos que forman parte del HTTR [3], los diagramas de tubería e instrumentación de la planta [4], tasas de fallas genéricas en dispositivos comunes de la planta [5] y un reporte sobre las experiencias obtenidas en un reactor nuclear enfriado con gas parecido al HTTR [6].

El propósito del presente es evaluar, con ayuda del Análisis Probabilístico de Seguridad (APS), la frecuencia de las secuencias de accidentes que resultan de los eventos que se consideran que más impactan a la seguridad de la planta productora de hidrógeno que se está construyendo en Japón.

El alcance de esta tesis es el de realizar un APS preliminar de eventos internos e incluir únicamente accidentes que podrían causar explosiones o liberación de productos de fisión. Los eventos de interés son los debidos al acoplamiento con un reactor nuclear, y no los que afectan específicamente al reactor. Además, se analizan las posibilidades de falla de los sistemas a un nivel de profundidad determinado por la existencia de datos de confiabilidad, generalmente empleados en APS de reactores nucleares.

En primer lugar en el capítulo 1 se habla sobre la definición del APS y los pasos a seguir para crear un APS desde la identificación de los eventos iniciadores haciendo uso de un estudio que no es probabilístico sobre los peligros y operabilidad (HAZOP), para después crear con los eventos iniciadores los árboles de eventos, colocando sistemas que mitiguen los efectos del evento iniciador y por último se colocan las consecuencias como los estados finales.

Por cada encabezado en los árboles de eventos, que presenta un sistema o dispositivo de mitigación, se crea un árbol de fallas. El árbol de fallas contiene los componentes que conforman al sistema y su configuración es arreglada por medio de compuertas lógicas.

El capítulo 2 está enfocado a la descripción de los sistemas del HTTR así como la manera en la cual actúan al tenerse un transitorio o una falla.

El capítulo 3 describe el proceso de reformación de metano con vapor; se incluye un balance de masa y energía; así como una comparación de una planta de reformación convencional con una que utiliza como fuente de energía térmica un reactor nuclear; además se realizó una descripción del reformador y sus características especiales en la configuración de la planta de reformación de metano. Por último en este capítulo se realiza el acoplamiento del reactor HTTR y la planta de reformación de metano. La información del capítulo 2 y 3 sirvió para conocer los sistemas de mitigación y la forma en que actúan para poder armar los árboles de eventos.

En el capítulo 4 se incluye la aplicación del APS al sistema del HTTR y la planta de reformación de metano, desde la aplicación de la técnica HAZOP

para identificar los eventos iniciadores, para después poder construir los árboles de eventos y los árboles de fallas. Cabe señalar que se eligieron los eventos iniciadores que consideramos más graves. Estos fueron tres rupturas postuladas en la ubicación que causaría mayor daño, sin perder de vista la objetividad del análisis. Por último de acuerdo a los resultados del análisis y la jerarquización de la contribución de los componentes a la probabilidad de falla de los sistemas, presentados en el capítulo 5, se realizan estudios de sensibilidad para conocer la influencia de algunos dispositivos sobre el estado final de cada evento. La frecuencia de ocurrencia de cada estado final contiene una cierta incertidumbre que permite visualizar mejor el rango de confiabilidad del análisis. Este rango de confiabilidad viene desde la variabilidad estadística de los valores de las tasas de falla de los componentes. La incertidumbre se obtiene a través de la propagación de las medidas de confiabilidad de los componentes requeridos para la evaluación de los modelos de sistemas.

Los estudios de sensibilidad se presentan en el capítulo 6.

Por último se escriben las conclusiones sobre el análisis y se dan sugerencias relacionadas con la planta al igual que se presentan proyectos futuros relacionados con el trabajo presentado.

## **CAPÍTULO 1. EL ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD.**

Un análisis probabilístico de seguridad (APS) es un término general para una valoración de riesgo, para el cual se desarrollan modelos para representar la probabilidad de falla de los sistemas y definir las combinaciones de fallas que pudieran llegar a afectar a la población. A grandes rasgos podríamos definir al APS como una investigación sistemática de los accidentes que pueden ocurrir en la operación de una planta, de los modos y causas por las que dichos accidentes pueden presentarse y, adicionalmente, permite una estimación de la frecuencia con la que pueden ocurrir tales eventos. Es necesario recalcar que un APS es un modelo que debe estar sujeto a constante revisión con el fin de poder ser de utilidad para mejorar la seguridad y operación de una planta.

Para poder iniciar el análisis se puede hacer uso de un método que nos indique los eventos iniciadores así como considerar eventos en la experiencia operacional de la planta o plantas similares. Los eventos iniciadores son aquellos eventos que pueden causar un estado final no deseado; por ejemplo un temblor o una ruptura en una tubería, podrían originar estados finales alarmantes, como una explosión o un incendio.

### **1.1. Técnica HAZOP**

Con el objetivo de identificar los eventos iniciadores así como peligros potenciales y proponer posibles áreas de mejora al diseño u operación de la planta, se emplea el análisis HAZOP (Hazard and Operability Study), el cual es un método no probabilístico. Esta técnica fue desarrollada para la identificación de riesgos en todo tipo de procesos, plantas y problemas en áreas de operación de instalaciones industriales. El método se utiliza para identificar eventos indeseados (eventos críticos para la seguridad del personal, la propia instalación, la población, etc.), y obtener una serie de propuestas de mejora, tendientes a minimizar su posibilidad de ocurrencia y efectos. Si el HAZOP se realiza y si las modificaciones son subsecuentemente implementadas para mitigar el riesgo, entonces la planta podría operar con menos riesgo que antes del estudio.

Originalmente fue desarrollada para la evaluación de nuevos diseños o tecnologías de procesos, pero su uso se ha extendido a todas las fases de la vida de la instalación. La base de aplicación de los estudios HAZOP es que los riesgos o los problemas aparecen sólo como consecuencia de desviaciones sobre las condiciones de operación que se consideran normales en un sistema dado.

En el análisis HAZOP, se realiza una revisión de los diagramas (tubería e instrumentación) y procedimientos de operación de emergencia en una serie de reuniones, durante las cuáles un equipo multidisciplinario hace uso de un protocolo para evaluar la importancia de las desviaciones de la operación normal de diseño de un sistema. El equipo de estudio consta de personal entrenado, capacitado en la tecnología y operación y que tenga la experiencia necesaria para responder a cualquier pregunta que surja durante la revisión sin necesidad de asistencia externa. Los participantes incluidos normalmente son: un experto en HAZOP (es indispensable), un ingeniero de proceso, un operador, y otros bastante familiarizados con la operación de la planta [7]. Es muy importante incluir a alguien con muchos años de experiencia operacional para la recopilación de frecuencias de eventos, sean cuantitativas o cualitativas.

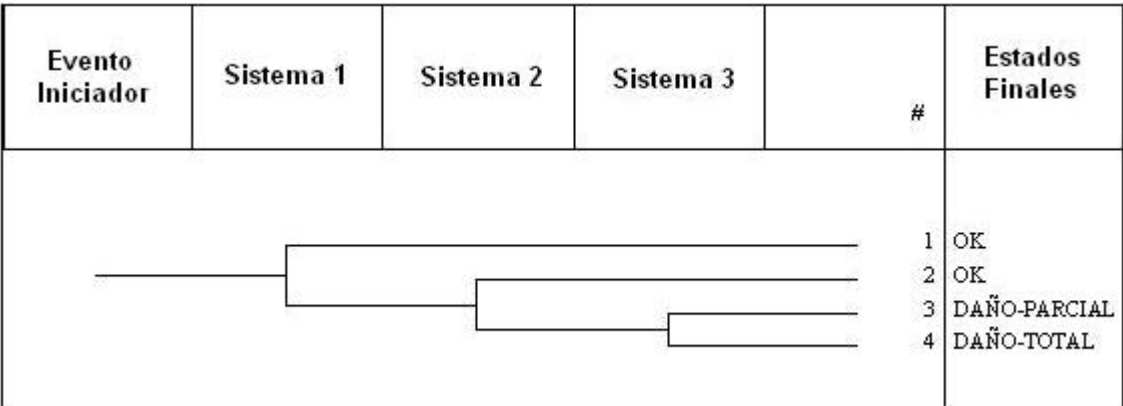
En la técnica de HAZOP se emplean palabras guía que son la pauta para rastrear la posible causa y las consecuencias que conlleva, las palabras guía se enfocan en desviaciones de parámetros normales de diseño y operación. Algunas palabras guía son: NO, MÁS, MENOS. Estas palabras guía se aplican a variables del proceso como temperatura, presión, flujo, etc. Posteriormente se definen las posibles desviaciones de operación para cada variable; por ejemplo la desviación de operación para la variable flujo podría ser: no flujo, flujo en sentido contrario, incremento de flujo, reducción de flujo. Otras palabras guía pueden ser usadas para construir más desviaciones de operación como por ejemplo: terremoto, huracán, apagado, encendido, accidente aéreo, frío severo, corrosión, erosión, sabotaje, etc. Por cada evento iniciador obtenido en el HAZOP se realiza un árbol de eventos. El evento iniciador provoca que funcionen sistemas de seguridad o de respaldo, los encabezados del árbol de eventos se encuentran formados por estos sistemas, los cuales son ordenados según la secuencia en la que deben actuar; las ramificaciones se forman al hacer fallar cada sistema y al final se obtienen estados finales en la punta de cada rama, (ver Figura 1).

**1.2. Árbol de Eventos.**

La información obtenida en el HAZOP es de utilidad para construir los árboles de eventos. Un árbol de eventos se construye por la ocurrencia de un evento iniciador. En el encabezado del árbol de eventos se colocan los sistemas que ayudarán a mitigar las consecuencias del evento iniciador, por ejemplo, si se tiene un evento iniciador, los sistemas que mitigarán los efectos del evento iniciador serán: sistema 1, sistema 2 y sistema 3. El árbol de eventos de este evento iniciador se muestra en la Figura 1.

Los sistemas de mitigación se colocan como encabezados en el árbol de eventos, el éxito de cada sistema es la rama superior, y el fracaso, la rama inferior.

Existen casos en que con un sistema de mitigación es suficiente para obtener un estado final que implique seguridad, por ejemplo en el árbol de eventos de la Figura 1, al accionarse adecuadamente el sistema 1 es suficiente para controlar el evento iniciador, por lo que no interesa si los sistemas 2 o 3 funcionan correctamente.



**Figura 1. Árbol de eventos para un evento iniciador.**

### 1.3. Árbol de Fallas.

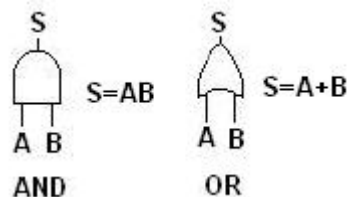
La herramienta principal para el análisis de sistemas es el árbol de fallas. Éste consiste en un diagrama lógico donde se representa la falla postulada de un sistema (evento tope) en términos de las fallas de sus componentes (eventos básicos) para los cuales, es posible obtener datos estadísticos. A partir del árbol de fallas se pueden obtener los conjuntos mínimos de corte, es decir, las combinaciones mutuamente exclusivas de eventos básicos que conducen a la falla del sistema; en base a éstos, la probabilidad de falla del sistema y la contribución de cada componente a esta probabilidad, pueden ser cuantificados.

En el desarrollo del árbol de falla se elabora un diagrama lógico que utiliza compuertas lógicas como la AND y la OR, en donde las ramas del árbol de fallas, representan combinaciones de eventos capaces de ocasionar el evento tope.

Por cada sistema de mitigación del árbol de eventos se debe construir un árbol de fallas, el cual incluirá todos los dispositivos que podrían ocasionar que se alcanzara el evento tope.

La representación gráfica utilizada en arreglos lógicos se muestra en la Figura 2, una compuerta lógica puede tener dos o más entradas pero sólo tiene una salida. La probabilidad de S es la suma o multiplicación de las probabilidades de A y B, cuando la compuerta es OR y AND respectivamente.

Se utilizan las reglas del álgebra booleana para evaluar las operaciones y poder expresar la salida en términos del conjunto de las entradas.



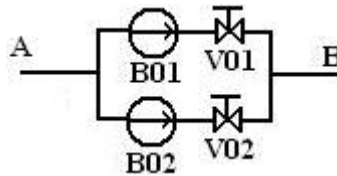
**Figura 2. Representación gráfica de las compuertas AND y OR.**

Un árbol de fallas se construye utilizando estas compuertas y observando el arreglo de los dispositivos. Si los dispositivos se encuentran en serie se utiliza una compuerta OR y si los dispositivos se encuentran conectados en paralelo dentro del sistema se utiliza una compuerta AND; de esta manera podemos saber cuándo utilizar una compuerta OR o una AND.

En el árbol de eventos del ejemplo de la Figura 1 se tienen tres encabezados, sin contar al evento iniciador. Cada uno de estos encabezados representa un sistema que puede mitigar el evento iniciador. La probabilidad de falla del sistema está relacionada con el arreglo y probabilidad de falla de los dispositivos que lo conforman, es aquí donde se utilizan los árboles de falla.

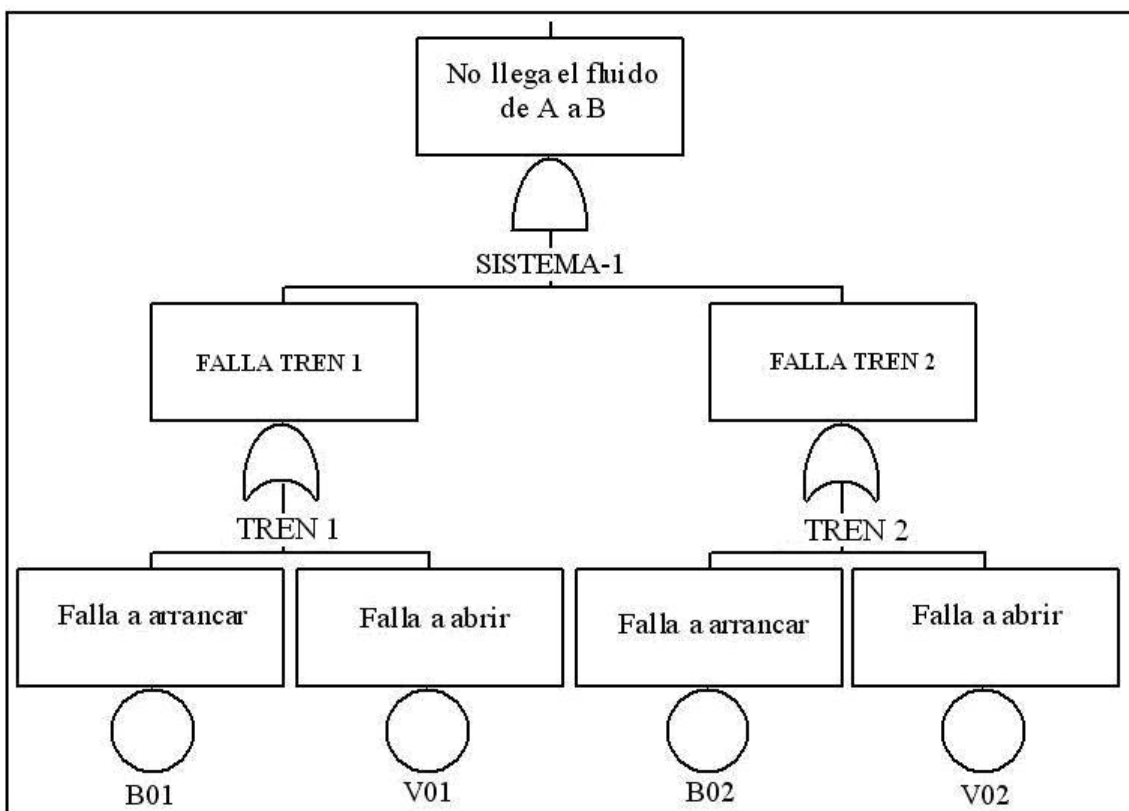
El nodo superior del árbol de fallas representa el evento de falla del sistema (o evento tope).

Supongamos que el Sistema 1 que forma parte del árbol de eventos mostrado en la Figura 1, consiste de dos válvulas manuales y de dos bombas con la configuración mostrada en la Figura 3.



**Figura 3. Representación gráfica del Sistema 1.**

El sistema 1 lleva un fluido de A a B, el evento tope es que no llegue ese fluido a B; se tienen dos trenes redundantes. Cada tren se compone de una bomba y una válvula. Los modos de falla de las bombas son falla a arrancar y falla a seguir operando dado que se arrancó, y el modo de falla de las válvulas es falla a abrir. El árbol de fallas correspondiente al sistema 1 es el mostrado en la Figura 4.



**Figura 4. Árbol de fallas del Sistema 1.**

#### 1.4. Análisis de Resultados y Pruebas de Sensibilidad.

Con los resultados de los árboles de fallas y de eventos podemos estimar la frecuencia de ocurrencia de cada estado final. De acuerdo a la frecuencia y a la intensidad del estado final se pueden realizar estudios para saber qué sistema influye más en la obtención del estado final y si es posible hacer más seguro el sistema, modificando la configuración de sus dispositivos o incluyendo más dispositivos redundantes o dispositivos más seguros; también se debe tener en cuenta el costo que implicaría realizar las modificaciones anteriores.

Además se pueden realizar pruebas de sensibilidad, éstas se realizan modificando la tasa de falla de dispositivos o de acciones humanas y observando las modificaciones en la frecuencia de ocurrencia de los estados finales, de esta forma se puede ver la influencia del dispositivo al que se le está realizando la prueba de sensibilidad sobre la frecuencia del estado final.

## **1.5. Incertidumbre en el Análisis de Riesgo.**

La incertidumbre puede ser definida como la falta de conocimiento preciso acerca de cuál es la verdad, sea ésta cualitativa o cuantitativa.

Esto crea dos problemas: no sabemos cuál es la verdad y tenemos que hacer el análisis de riesgo y tomar decisiones a la luz de esta incertidumbre.

El objetivo de hacer un análisis de incertidumbre es mejorar la calidad del proceso de toma de decisiones.

El término incertidumbre es muy rico, y puede incluir una variedad de conceptos.

La incertidumbre se puede originar por Información incompleta, desacuerdo entre dos fuentes de información e imprecisión lingüística; la incertidumbre también se puede referir a variabilidad.

La incertidumbre en los parámetros se debe a:

### **1. Errores de medición**

Son generalmente los más estudiados. Ningún proceso de medición es perfecto.

Se pueden clasificar en:

- Errores aleatorios: tienden a cero con más y mejores mediciones.
- Errores sistemáticos: es un sesgo con respecto al valor verdadero que puede resultar de calibración imprecisa de los instrumentos, errores de lectura, errores en los supuestos usados para inferir los datos de las medidas observadas. No se reduce aumentando el número de mediciones.

### **2. Errores de muestreo**

Aparecen en el proceso de analizar una muestra de la población para inferir datos acerca de la población total. Se reducen al aumentar el tamaño de la muestra.

### **3. Uso de datos genéricos**

Surgen cuando no existen datos reales y es necesario usar datos tomados de otros análisis.

### **4. Desacuerdo**

Si el conocimiento no es perfecto (como ocurre en áreas en desarrollo) existirá probablemente desacuerdo entre científicos acerca de cuál es la verdad.

#### **1.5.1. Simulación de Montecarlo.**

Montecarlo es un método de muestreo estadístico avanzado para la realización de estudios de sensibilidad e incertidumbre sobre modelos numéricos. Estos modelos numéricos pueden representar problemas físicos, lógicos o de otra índole, y varios de sus parámetros intrínsecos o variables de entrada son tratados simultáneamente como variables aleatorias, por el método de Montecarlo.



En la técnica de Montecarlo para la obtención de muestras representativas se debe realizar alrededor de 1000 entradas.

### **Características del método Montecarlo.**

- Es un método de simulación para propagar la incertidumbre de los parámetros de un modelo.
- Se muestrea la distribución de cada variable incierta (usando un generador de números aleatorios)
- Se resuelve el problema  $n$  veces (muestreando cada vez cada variable de la correspondiente distribución de probabilidades)
- Se obtiene un conjunto de valores para el resultado, no un solo valor.
- A partir de ellos se pueden calcular las estadísticas de la respuesta: media, intervalos de confianza, etc.
- Su precisión depende de  $n$ .
- Permite identificar variables más influyentes en el análisis.

Debido a lo novedoso de la planta de reformación de metano acoplada a un reactor nuclear HTTR, para la realización de esta tesis no se tuvo conocimiento de procedimientos de operación y de entrenamiento, además de que se utilizaron dispositivos genéricos con sus respectivos factores de error. Los resultados se reportan sobre un rango con 90% de certeza.

### **1.6. SAPHIRE**

SAPHIRE es un programa de cómputo desarrollado por el Instituto Nacional de Energía y Ambiente de Idaho (INEEL por sus siglas en inglés) como una herramienta para realizar y evaluar árboles de eventos y de fallas usando una computadora personal.

La comisión de regulación nuclear de los Estados Unidos de Norteamérica, ha desarrollado un conjunto de programas para computadoras personales que permite realizar Análisis Probabilísticos de Seguridad. Este sistema, conocido como SAPHIRE, ofrece al analista muchas funciones necesarias para crear, evaluar y cuantificar el riesgo asociado. Este programa incluye *software* para definir la estructura de la base de datos para crear, analizar, cuantificar los datos, desplegar resultados y para realizar análisis de sensibilidad. El sistema ofrece la funcionalidad de llevar un Análisis Probabilístico de Seguridad del estado conceptual a un trabajo de publicación, a través de la opción de crear reportes.

SAPHIRE es un programa desarrollado con el fin de realizar las funciones necesarias para crear y analizar un Análisis Probabilístico de Seguridad. Incluye funciones que permiten al usuario crear árboles de eventos y de fallas, definir secuencias de accidentes y datos de fallas de eventos básicos, resolver árboles de fallas de sistemas y secuencias de accidente, cuantificar conjuntos mínimos de corte y realizar un análisis de incertidumbre de los resultados.

También se incluye en este programa, características que permiten al analista generar reportes y desplegarlos para poder documentar el análisis.

SAPHIRE utiliza álgebra booleana para evaluar los árboles de eventos y de fallas y obtener los conjuntos mínimos de corte.

La versión de SAPHIRE utilizada en esta tesis es la 6.77 y corre sobre el sistema operativo Windows.

Para los análisis de incertidumbre, SAPHIRE utiliza un muestreo de Montecarlo o Latin Hypercube. El análisis mostrado aquí, tanto árboles de fallas y de eventos fueron desarrollados y evaluados en SAPHIRE, al igual que el estudio de sensibilidad. En la Figura 5 se muestra la pantalla de inicio de SAPHIRE.

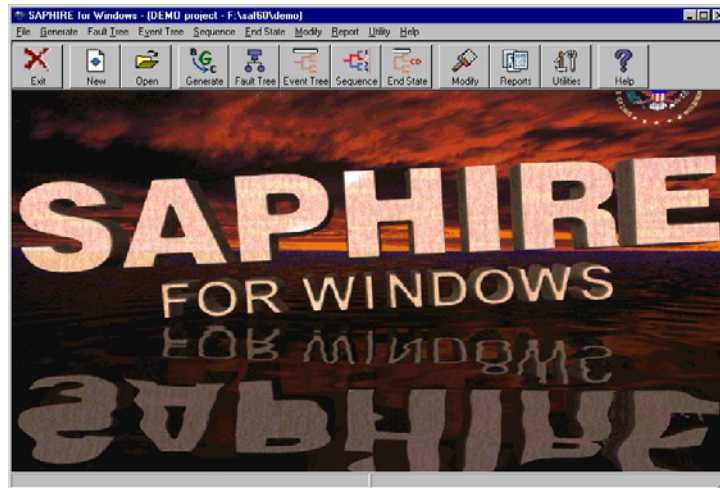


Figura 5. Pantalla de SAPHIRE en una PC.

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS DEL HTTR.

Es necesario conocer el diseño del HTTR así como el funcionamiento de sus sistemas de seguridad, para poder ordenar en los encabezados de los árboles de eventos la secuencia en que actuará cada sistema. También es necesario conocer los dispositivos que conforman a los sistemas incluidos en el árbol de eventos para poder construir los árboles de fallas de cada sistema. A continuación se presenta una descripción de los principales sistemas del HTTR [3].

### 2.1. Edificios Principales del HTTR.

La planta HTTR está compuesta por un edificio del reactor, un edificio de combustible gastado, un edificio de maquinaria y almacenes. El edificio del reactor mide 48m x 50m con dos pisos sobre el nivel del suelo y tres pisos bajo el suelo. La mayoría de los componentes, como la vasija de presión del reactor (RPV) y los componentes del sistema primario de refrigeración están instalados dentro de la contención de la vasija. Los ventiladores del sistema principal de enfriamiento (MCS) y del sistema auxiliar de enfriamiento (ACS) se encuentran localizados en la azotea del edificio del reactor. El arreglo de la planta HTTR se muestra en la Figura 6.

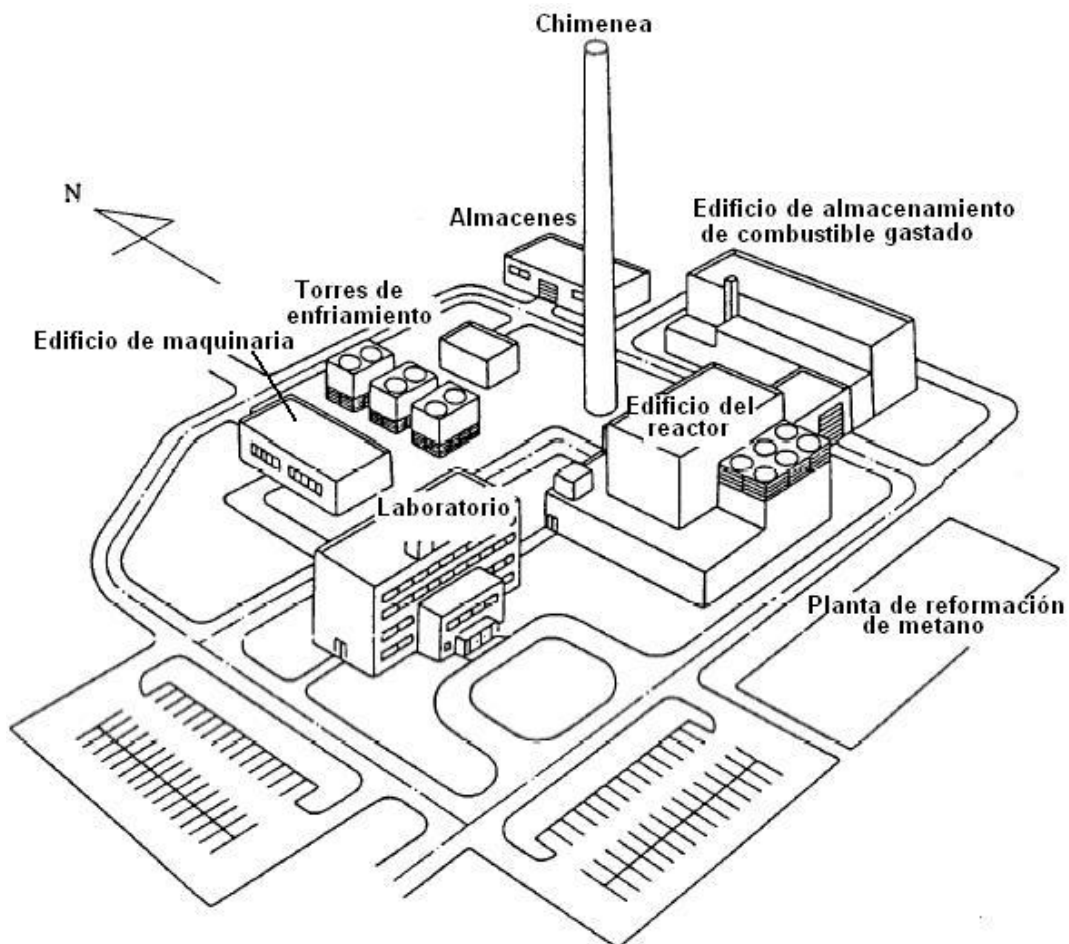
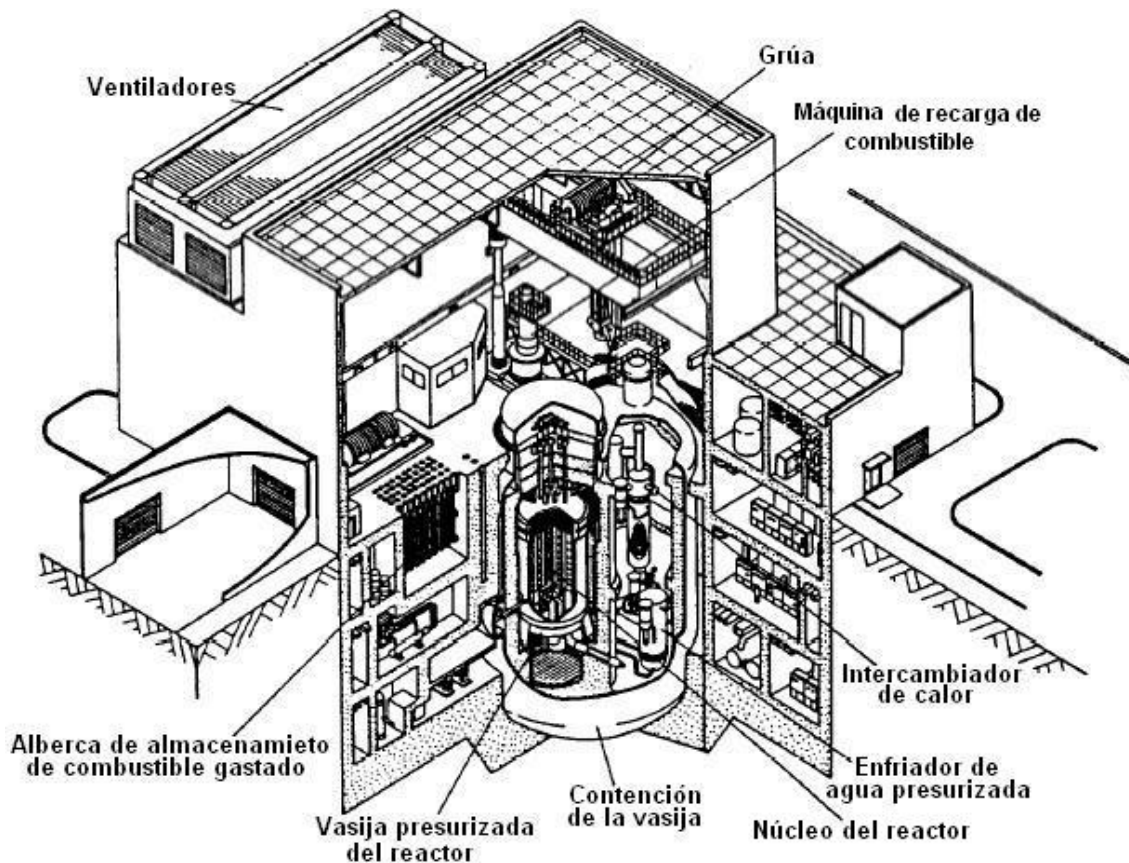


Figura 6. Principales edificios de la planta.

## 2.2. Edificio del Reactor.

En la Figura 7 se muestra el arreglo del edificio del reactor con sus principales instalaciones y componentes, los cuales serán descritos más adelante. El edificio del reactor está soportado por una capa de arena formada durante la era cuaternaria, y fue evaluado estructuralmente por estudios sísmicos que verificaron que la tierra de apoyo del sitio tiene la seguridad sísmica equivalente a una base de piedra.



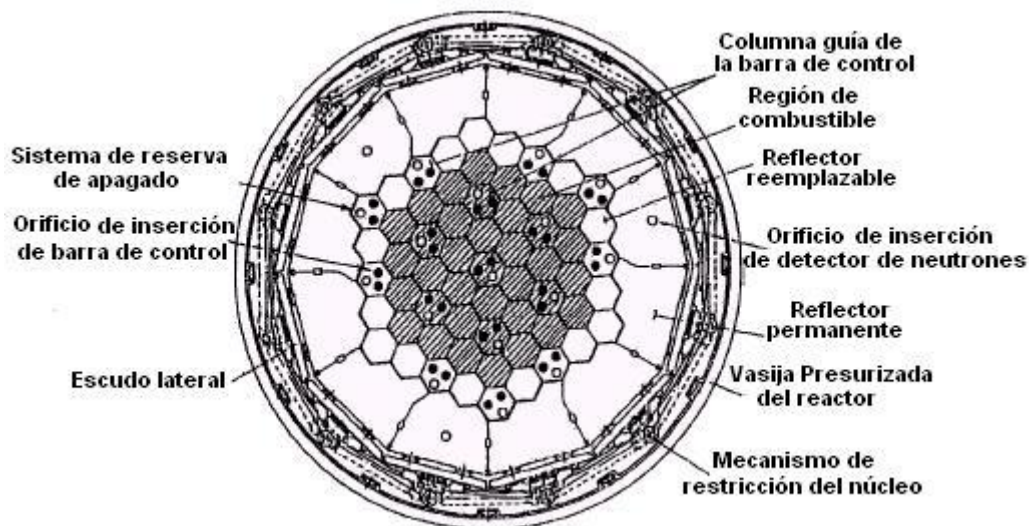
**Figura 7. Edificio del reactor.**

## 2.3. Núcleo del HTTR.

El núcleo del reactor del HTTR está diseñado para generar 30 MW térmicos de potencia. Tiene una temperatura de salida del refrigerante de 900°C en operación normal.

El núcleo consiste de un arreglo hexagonal de ensamblajes de grafito y combustible llamado "Pin-in-block", barras de control y grafito como reflector.

El núcleo se apoya en una estructura de grafito que sirve como soporte y es comprimido por un mecanismo de restricción del núcleo (Figura. 8).



**Figura 8. Arreglo horizontal del núcleo.**

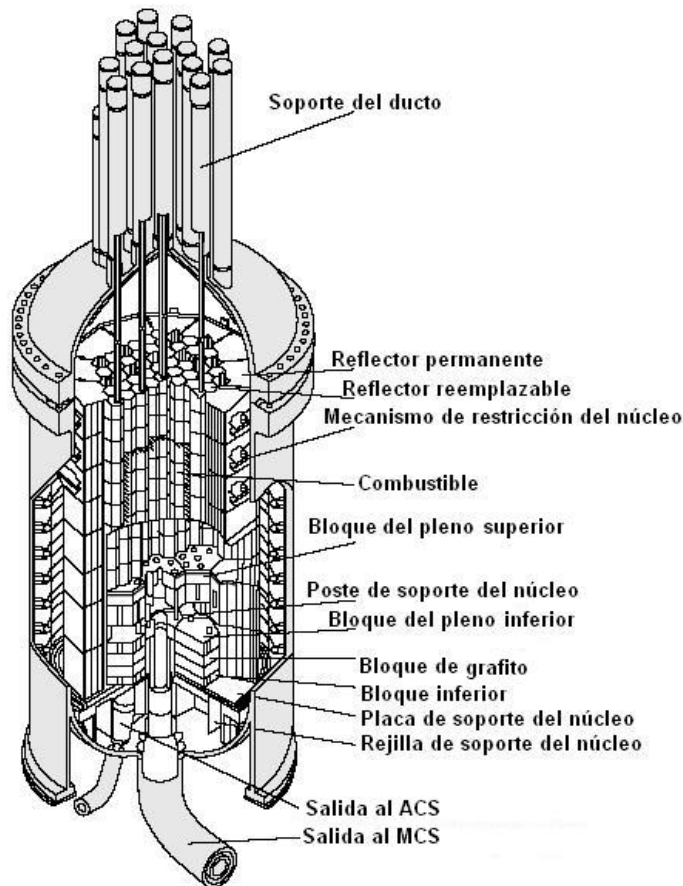
El combustible de tipo bloque se adoptó en el HTTR, en lugar del combustible del tipo cama de esferas (“Pebble-Bed”) (Fig. 9). La razón principal es que el HTTR no sólo es un reactor de prueba para el desarrollo de tecnología del HTGR, sino también una herramienta para acomodar los espacios de irradiación para la investigación básica en el campo de diseño de alta temperatura, que puede lograrse fácilmente en el combustible de tipo bloque en lugar del “Pebble-Bed”.



**Figura 9. Comparación de los tipos de combustible utilizados por el HTTR (izquierda) y por el reactor Pebble-Bed (derecha)**

#### **2.4. Vasija Presurizada del Reactor (RPV).**

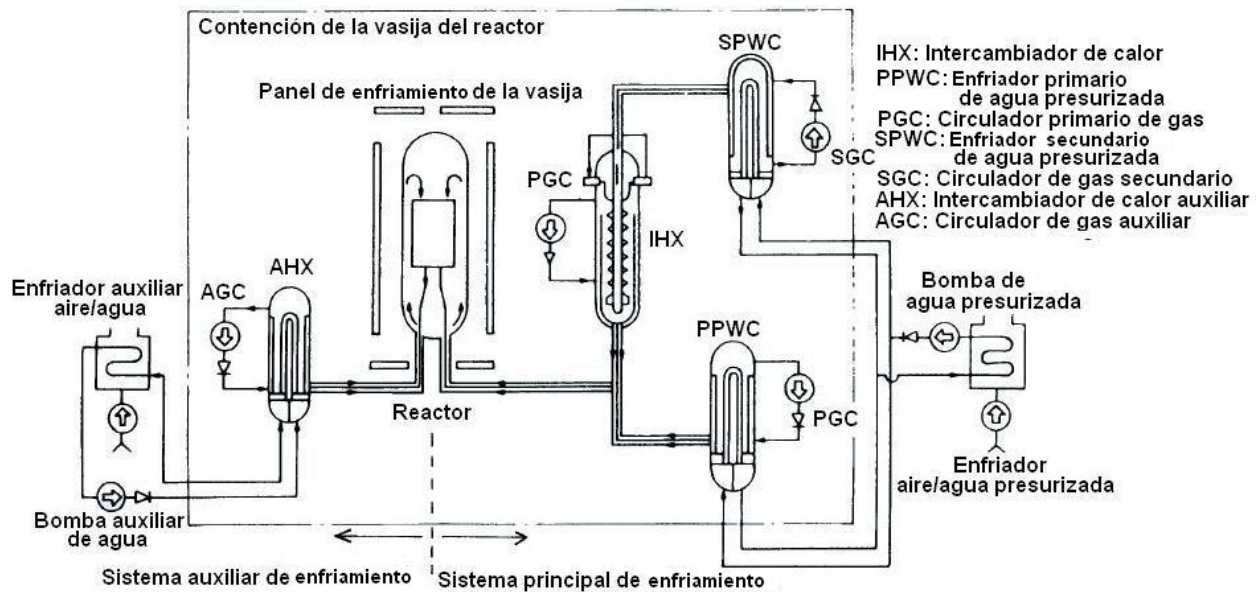
La vasija presurizada del reactor (RPV) consiste de un cilindro vertical, con una tapa y una base semiesférica y 31 tubos de posición que se categorizan como tubos de posición para barras de control (CR), tubos de posición de irradiación, tubos de posición para instrumentación, etc. (Ver Figura 10)



**Figura 10. Vasija presurizada del reactor.**

## 2.5. Principales Consideraciones de Seguridad en el HTTR.

Una de las principales características de la seguridad del HTTR lo representa su combustible, el cual está constituido de partículas de combustible revestido (CFP's) las cuales no deben fallar durante operación normal y transitorios operacionales esperados (AOO's por sus siglas en inglés). Entre las características de seguridad del reactor están: la temperatura máxima del combustible no excede los 1600°C en cualquier AOO. El reactor será apagado de manera segura y confiable durante operación usando un sistema de barras de control (CR). Además, se cuenta con un sistema de apagado de reserva (RSS) el cual es independiente del sistema de barras de control. Otro sistema está diseñado para remover el calor residual después del apagado del reactor para cualquier AOO o accidente. El HTTR cuenta con una contención de la vasija (CV) para prevenir una liberación de los productos de fisión (FP's) y el ingreso excesivo de aire en caso de un accidente de despresurización. La presión en el sistema enfriador de agua presurizada (PWCS) será controlada y tendrá una presión menor que la del gas primario de helio, para prevenir que una gran cantidad de agua ingrese en el núcleo, en caso de una ruptura en los tubos del intercambiador de calor del enfriador primario de agua presurizada (PPWC). La presión de helio en el sistema secundario enfriador de helio (SHCS) será levemente mayor que en el primario para prevenir fugas de productos de fisión, desde el sistema primario de enfriamiento (PCS) al secundario, a través de una ruptura en un tubo de transferencia de calor del intercambiador de calor (IHX). En la Figura 11 se muestran los principales sistemas de enfriamiento del reactor.



**Figura 11. Sistema de refrigeración del HTTR.**

## 2.6. Control y Apagado del Reactor.

El control de potencia y apagado normal del HTTR es realizado por 16 pares de barras de control, o 15 pares cuando la columna central del núcleo es usada para pruebas de radiación.

El reactor es apagado de manera segura y confiable en cualquier condición de operación usando el sistema de barras de control. El sistema de barras de control puede alcanzar la subcriticidad desde cualquier condición de operación y mantenerse subcrítico en el núcleo frío, aún cuando un par de barras de control se mantengan en su posición de operación.

Todos los pares de barras de control están individualmente soportadas por un mecanismo activador de barras de control (CRDMs), el cual está alojado dentro de los tubos de posición. El CRDM inserta y retira un par de las barras de control durante operación normal.

Cuando se recibe una señal de SCRAM durante operación normal, las barras de control son liberadas del mecanismo activador y son insertadas por gravedad; la temperatura del encamisado alcanza una temperatura próxima a los 900 °C. Para prevenir el daño térmico del encamisado de las barras de control, nueve pares de las barras de control son inicialmente insertadas dentro de los hoyos de las columnas reemplazables de reflector. El resto, siete pares de las barras de control son insertadas dentro de los orificios de las columnas del núcleo activo; después el núcleo es enfriado y la temperatura de salida del refrigerante del núcleo decrece por debajo de 750°C. La temperatura del núcleo se determina monitoreando la temperatura de salida del helio.

Además, se cuenta con un sistema de apagado de reserva (RSS), el cual funciona como un sistema de respaldo de apagado para las barras de control y opera principalmente insertando pelotitas de carburo de boro/grafito dentro del tercer canal en cada columna guía de las barras de control.

## 2.7. Sistema de Refrigeración y Remoción del Calor Residual.

El sistema está compuesto por el sistema principal de enfriamiento (MCS), un sistema auxiliar de enfriamiento (ACS) y dos sistemas de enfriamiento de la vasija (VCS).

El MCS en operación normal, remueve la energía térmica del núcleo del reactor. Cuando el reactor trabaja en carga en paralelo, el MCS absorbe 20 MW, mientras que 10 MW van al intercambiador de calor (IHX). En carga única el MCS tiene la capacidad de absorber los 30 MW del reactor. En un apagado programado del reactor, el MCS remueve el calor residual, mientras que en el caso de ocurrir AOO's y accidentes, el ACS y los VCSs funcionan como sistemas removedores de calor residual después de un SCRAM.

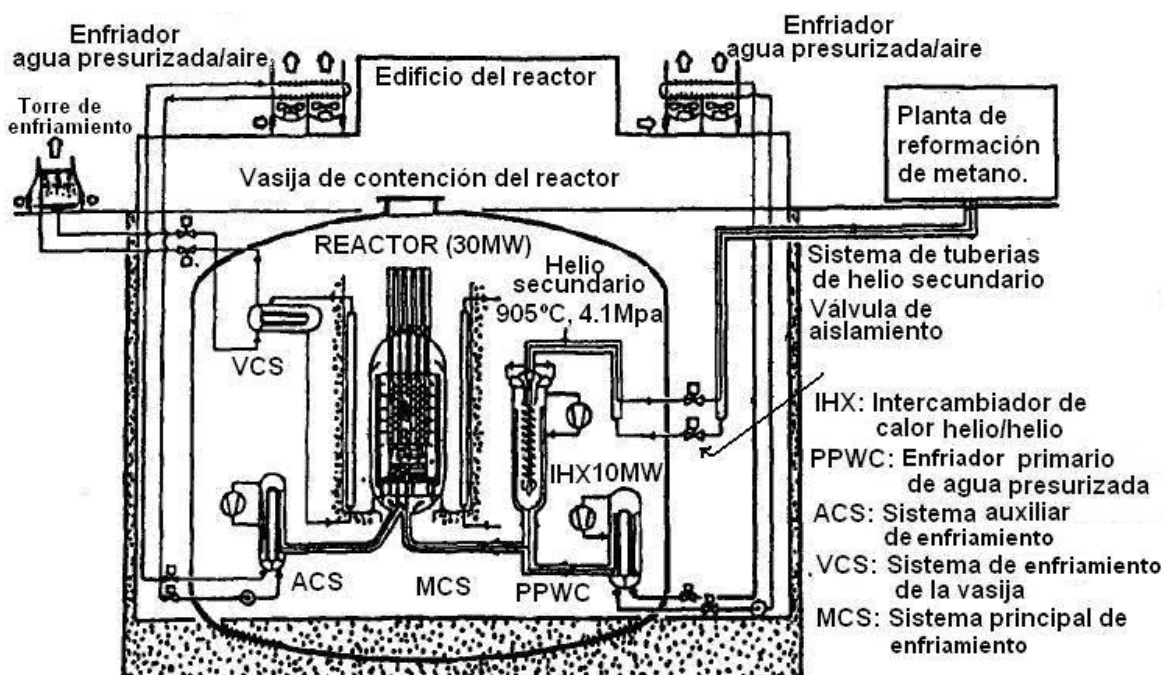
El ACS es un sistema seguro con componentes dinámicos redundantes, como un recirculador de gas, bombas de agua y válvulas, las cuales son respaldadas con un suministro eléctrico de emergencia.

El VCS funciona como un sistema removedor de calor cuando la circulación forzada en el sistema primario de refrigeración no está disponible. Este sistema también está en servicio durante la operación normal para enfriar la pared de concreto que rodea al reactor.

El calor residual del núcleo puede ser removido por el VCS sin el ACS. El ACS, sin embargo, es necesario desde el punto de vista de flexibilidad operacional, ya que al VCS le tomaría mucho tiempo enfriar el núcleo sin el ACS.

El VCS también está equipado con un sistema de seguridad con dos juegos completamente independientes, los cuales son respaldados por un suministro eléctrico de emergencia.

La Figura 12 muestra los principales sistemas de enfriamiento del reactor.





## **Figura 12. Principales sistemas de enfriamiento del reactor.**

### **2.8. Sistema Principal de Enfriamiento (MCS).**

El MCS consiste de un intercambiador de calor (IHX), un enfriador primario de agua presurizada (PPWC), un enfriador secundario de agua presurizada (SPWC) y un enfriador aire/agua presurizada. Tanto el PPWC como el SPWC están compuestos de un intercambiador de calor de agua/helio. El MCS tiene dos modos de operación; “operación en una sola carga” y “operación con carga en paralelo”. El PPWC es operado para remover el calor del reactor de 30 MW durante la operación en una sola carga, mientras que en operación en carga en paralelo, el IHX remueve 10 MW de energía y el PPWC remueve 20 MW. El SPWC subsecuentemente remueve el calor desde el IHX. El calor removido por el PPWC y el SPWC es transportado a través del agua presurizada a 3.5 MPa. Esta agua es enfriada por un enfriador de aire. En el HTTR, el calor del reactor es eventualmente transferido a la atmósfera. Durante la operación normal, la presión del helio secundario es controlado para mantener una presión de 0.1 MPa más alto que la presión del helio primario en el IHX. Esto permite una reducción en la carga de presión de los tubos y permite proteger de una fuga accidental de materiales radiactivos dentro del lazo secundario de helio. La presión del agua siempre es controlada a 3.5 MPa para que una cantidad grande de agua no ingrese dentro del núcleo durante un accidente de ruptura de tubos del PPWC.

### **2.9. Sistema Auxiliar de Enfriamiento (ACS).**

El ACS consiste de un intercambiador de calor auxiliar (AHX), dos circuladores auxiliares de helio y un enfriador de aire. Durante operación normal, un pequeño flujo de helio (200 kg/h) pasa a través del AHX a un sistema primario de purificación de helio para remover impurezas contenidas en el refrigerante del reactor. En un SCRAM del reactor, con las fronteras del refrigerador presurizado del reactor intactas, el sistema auxiliar de enfriamiento auxiliar de helio arranca automáticamente y transfiere el calor residual desde el núcleo al enfriador de aire. El AHX tiene una capacidad de transferencia de aproximadamente 3.5 MW.

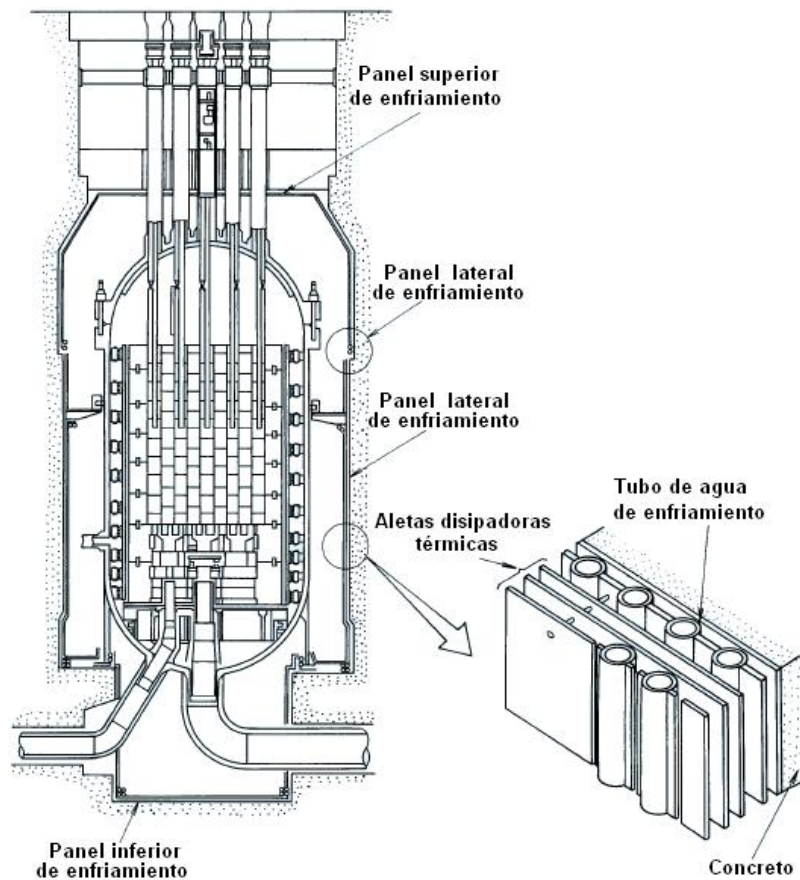
### **2.10. Sistema de Enfriamiento de la Vasija (VCS).**

Dos sistemas de enfriamiento de la vasija (VCSs) previenen que el núcleo del reactor y la misma vasija tengan daños térmicos, debidos al calor residual después del SCRAM del reactor, cuando el ACS no enfría al núcleo. El VCS consiste de paneles de enfriamiento por agua que rodean a la vasija del reactor y dos sistemas de enfriamiento de agua. La Figura 13 muestra la distribución de los paneles.

Cada uno de los sistemas por si solo es capaz de controlar temperaturas del núcleo y la vasija dentro de los límites seguros.

El VCS está diseñado para tener una tasa de remoción de calor de la vasija de 0.6 MW o menos durante operación normal, para permitir la transferencia de calor del reactor eficazmente a los MCS tanto como sea posible, y también 0.3 MW o más durante un accidente para remover el calor residual del núcleo.

El VCS es diseñado como un equipo seguro, para esto se cuenta con dos sistemas completamente independientes, los cuales son respaldados con un sistema de emergencia de suministro de energía. Incluso está en servicio durante operación normal para enfriar la pared de concreto.



**Figura 13. Distribución de los paneles del VCS.**

### **2.11. Barreras Múltiples para Evitar la Liberación de Productos de Fisión.**

El HTTR tiene múltiples barreras para la liberación de productos de fisión al ambiente, llamadas: revestimiento de combustible, la vasija presurizada, la contención de la vasija y el edificio del reactor. La función de la contención de la vasija en el HTTR es contener los productos de la fisión y limitar la cantidad de aire, el cual reaccionaría con el grafito del núcleo, en caso de un accidente.

Algunos compartimientos alrededor de la contención de la vasija (CV), en el edificio del reactor, sirven como un confinamiento, como el área de servicio (SA). El área de servicio se mantiene con una ligera presión negativa con respecto a la atmosférica por un sistema de aire acondicionado durante funcionamiento normal y condiciones de accidente. Las barreras de la contención de la vasija y el área de servicio en el edificio del reactor reducen drásticamente la dosis de radiación fuera de sitio en caso de accidente, como en el caso de una ruptura en el ducto primario.

Además, en el accidente de despresurización, la única medida para restringir la entrada de aire al núcleo del reactor es por medio de la contención de la vasija. Componentes mayores, incluyendo el sistema primario de refrigeración, así como la vasija presurizada del reactor, están contenidas dentro de la contención de la vasija. En la Figura 14 se ilustran las principales barreras contra la liberación de los productos de fisión.

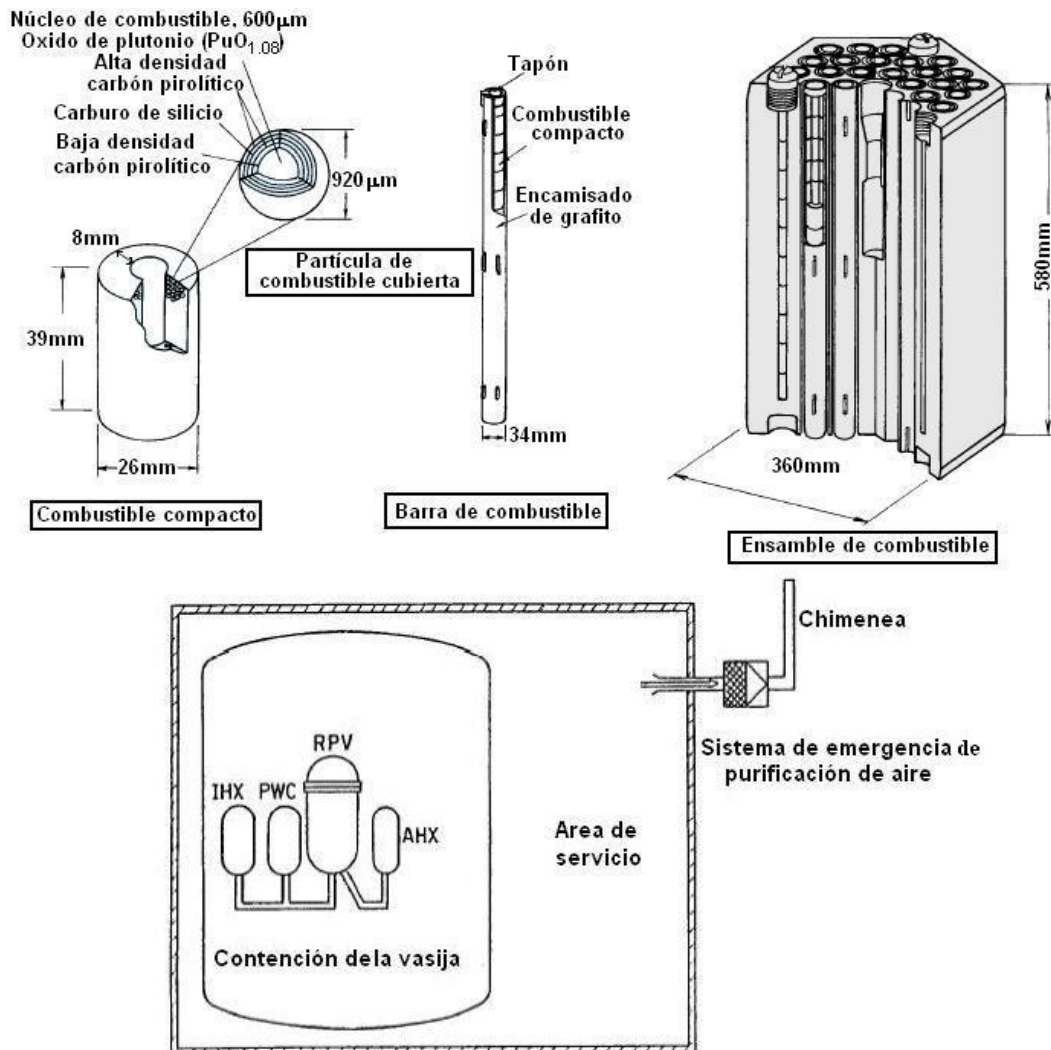


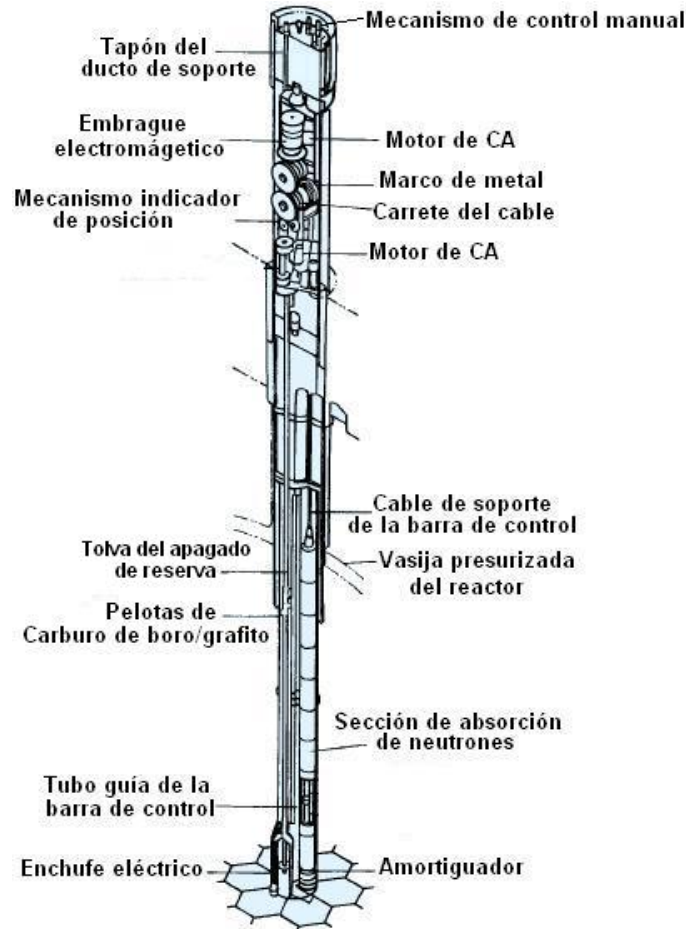
Figura 14. Principales barreras contra la liberación de productos de fisión.

## 2.12. Sistema de Barras de Control.

La reactividad es controlada por las barras de control, las cuales son soportadas individualmente por los mecanismos accionadores de las barras de control, localizados en unos tubos verticales conectados a la parte superior de la semiesfera de la vasija presurizada del reactor. Las barras de control son insertadas dentro de sus propios orificios en el núcleo y en la región del reflector reemplazable.

Los mecanismos accionadores de las barras de control (CRDM) insertan y retiran un par de barras de control usando un motor de corriente alterna (CA). El evento de SCRAM, causa una separación del equipo de agarre, por lo que las barras de control son insertadas dentro del núcleo por gravedad. Con la señal de SCRAM, nueve pares de barras de control son insertadas inmediatamente en la región del reflector reemplazable, mientras los otros siete pares son insertados en la región del núcleo 40 minutos después, cuando la temperatura de salida del refrigerante es menor a 750°C. Este método de dos pasos de inserción es empleado principalmente para prevenir un sobrecalentamiento en la envoltura de las barras de control insertadas en la región del núcleo.

La Figura 15 muestra el sistema de las barras de control.



**Figura 15. Diseño de la barra de control.**

Los siguientes criterios fueron tomados en cuenta para el diseño de las barras de control.

- 1) El sistema de barra de control está diseñado para apagar el reactor de manera fiable y segura cuando sea requerido, bajo condiciones normales y de accidentes incluyendo terremotos.
- 2) El sistema de barra de control debe ser capaz de controlar los cambios de reactividad debido a
  - densidad y temperatura del Xenón
  - quemado del combustible y
  - muestras experimentales, etc.
- 3) El sistema de barra de control está diseñado para falla segura.
- 4) El valor de reactividad y la tasa de inserción de reactividad de una barras de control, debe ser determinada de tal manera que no ocurra una ruptura en los internos de la vasija (impidiendo con esto el enfriamiento del núcleo), en el caso de un accidente de inserción de reactividad.

### CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE REFORMACIÓN DE METANO.

El proceso de reformación de metano es una técnica madura y la más eficiente y económica utilizada actualmente para producir hidrógeno. Comúnmente se utiliza el mismo gas natural como combustible para una caldera que suministrará el calor necesario para el proceso de reformación. En la planta estudiada en esta tesis se sustituye la caldera por un reactor nuclear que se acopla a la planta de reformación de metano.

En este capítulo se describe el proceso de reformación y los principales dispositivos de la planta de reformación de metano.

#### 3.1. Descripción del Proceso de Reformación de Metano.

La manera más eficiente y económica para generar hidrógeno es a través del proceso de reformación de metano, aunque el uso de este método genera dióxido de carbono. La producción de este gas de efecto invernadero se reduce cerca de un 22% [6] al utilizar un reactor nuclear como fuente de calor. El método de reformación de metano consiste en romper con la ayuda del calor y el vapor de agua, el enlace entre el carbono y el hidrógeno del metano, esto origina que el carbono se oxide generando dióxido de carbono por una parte y por el otro hidrógeno.

El proceso de reformación de metano es el siguiente: se inyecta gas natural que pasa por un desulfurizador para reducir la producción de SOx, una vez reducido el nivel de azufre del gas natural, se mezcla con vapor de agua sobrecalentado y entran al reformador en el cual se genera monóxido de carbono e hidrógeno. A la mezcla resultante se le agrega más agua para generar más hidrógeno y generar dióxido de carbono, el cual es menos contaminante que el monóxido de carbono; esta reacción se lleva a cabo en el *shift reactor*. El proceso se muestra en la Figura 16.

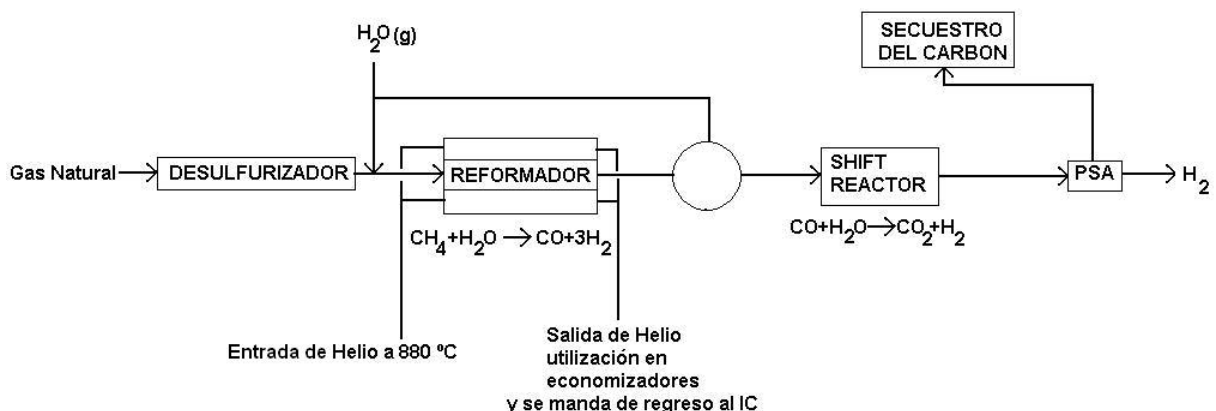
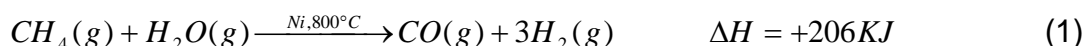


Figura 16. Representación modular del proceso de reformación de metano.

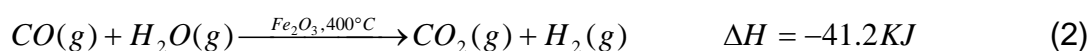
Este es un proceso que transcurre en varias etapas:

(1) Reacción endotérmica catalizada con níquel entre el metano (gas natural) con vapor de agua a alta temperatura produciendo una mezcla de CO e H<sub>2</sub> llamada syngas, para llevar a cabo esta reacción se deben proporcionar 206 KJ al sistema:

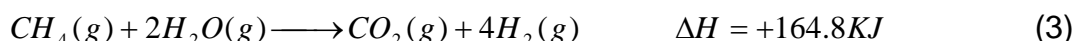


La mezcla gaseosa así obtenida es difícil de separar ya sea física o químicamente (es necesario enfriar hasta  $-205^\circ C$  antes de que el CO pueda condensar).

(2) Para aumentar el rendimiento y facilitar también la separación posterior, el CO se oxida a  $CO_2$ . Para ello, la mezcla es enfriada y se le inyecta vapor de agua de nuevo, esta vez sobre un catalizador de  $Fe_2O_3$ .



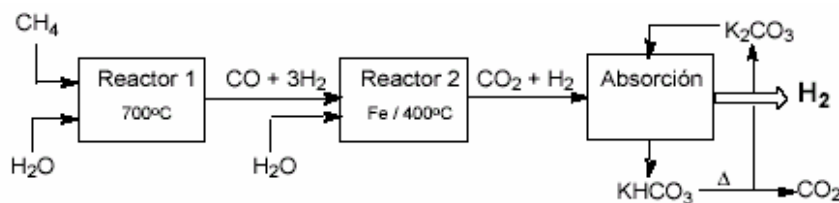
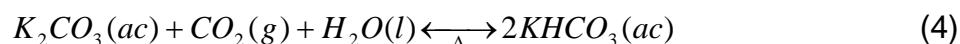
La reacción global es por tanto:



El problema de separar el dióxido de carbono de la molécula de hidrógeno es más sencillo. Hay varias formas de abordar la separación:

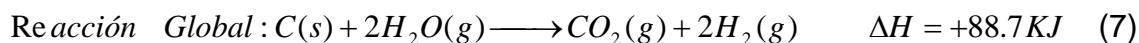
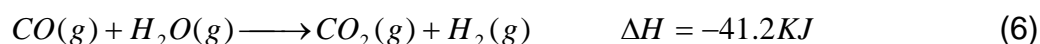
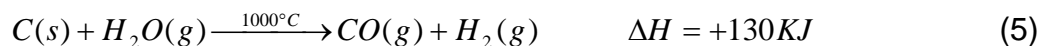
(1) Medios físicos. Una opción es enfriar la mezcla por debajo de la temperatura de condensación del  $CO_2$  ( $-78^\circ C$ ) muy diferente a la del  $H_2$  ( $-253^\circ C$ ).

(2) Medios químicos. El  $CO_2$  es un óxido ácido que reacciona con una disolución de carbonato potásico para dar el carbonato ácido de potasio, el proceso se muestra en la Figura 17. Calentando éste se puede regenerar el carbonato:



**Figura 17. Esquema gráfico del proceso de reformado.**

Una alternativa al metano es la utilización de cualquier otro hidrocarburo o incluso el carbón (más abundante):

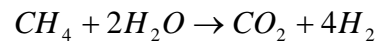


### 3.2. Balances de Masa y Energía para el Proceso de Reformación de Metano con Vapor

Consideremos un balance de masa y energía global de la planta convencional de reformación de metano con vapor de agua, en estado estacionario.

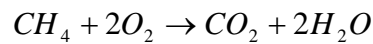
Reformado (molar)

de (3)



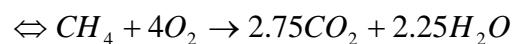
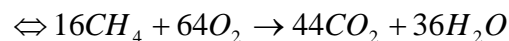
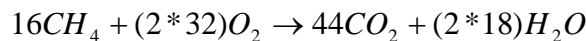
$$\Delta H_R = 15.8 \left[ \frac{MJ}{kg_{CH_4}} \right]$$

Combustión (molar, en una caldera)

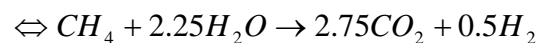
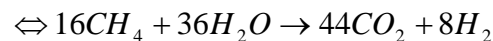
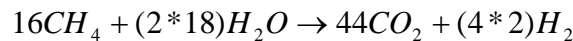


$$\Delta H_R = -55 \left[ \frac{MJ}{kg_{CH_4}} \right] \quad (8)$$

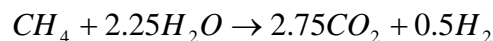
A partir de (8) se tiene la siguiente reacción balanceada en masa (kg)



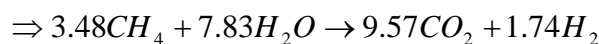
Por otro lado a partir de (3) se tiene la siguiente reacción en base másica (kg)



y dado que,

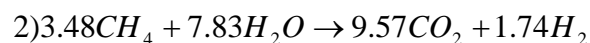
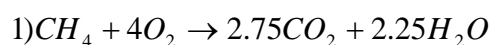


$$\Delta H_R = 15.8 \left[ \frac{MJ}{kg_{CH_4}} \right]$$



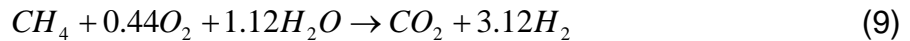
$$\text{requiere : } H_R = 15.8 \left[ \frac{MJ}{kg_{CH_4}} \right]$$

Una vez realizado el balance de masa y de energía para la planta de reformación de metano con vapor, se tienen las siguientes reacciones en base másica (kg).

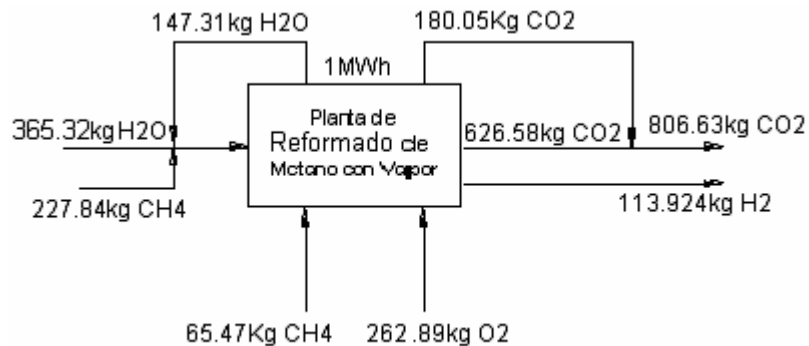


Normalizando  $CH_4 + 0.89O_2 + 1.25H_2O \rightarrow 2.75CO_2 + 0.39H_2$

El que expresado en estequiometría molar corresponde a:

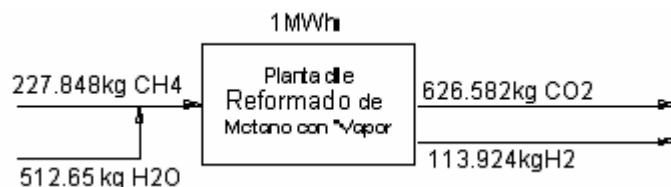


Por el método tradicional de reformación de metano con vapor, para 1MWh (térmico) se tendrá el balance de masas mostrado en la Figura 18.



**Figura 18. Balance de masas para 1MWh, utilizando el método tradicional de reformación de metano con vapor.**

Utilizando la energía nuclear de un reactor se tendrá el siguiente balance de masas mostrado en la Figura 19, para el mismo MWh térmico. Nótese que cuando se utiliza el reactor nuclear como fuente de calor se evita la emisión de 180.05 kg de CO<sub>2</sub> producidos en la combustión de metano del proceso descrito arriba.



**Figura 19. Balance de masas para 1MWh, utilizando un reactor nuclear para suministrar la energía requerida para el proceso de reformación de metano con vapor.**

### 3.3. Reformador nuclear de metano.

El reactor nuclear de alta temperatura es la fuente de calor que calienta el helio, el cual fluye a una temperatura aproximada de 950 °C y calienta los tubos del reformador. En la Figura 20 se aprecia uno de estos tubos.



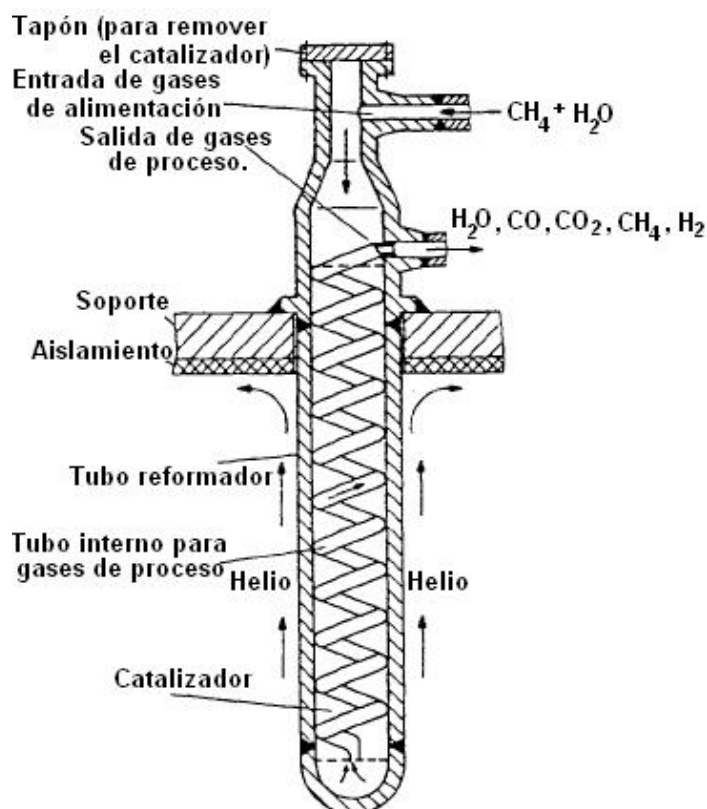


Figura 20. Descripción de un tubo reformador [8].

El helio bajo presión muestra excelentes propiedades de transferencia de calor. Deben tomarse precauciones para minimizar esfuerzos térmicos debidos, por ejemplo, a un flujo no uniforme de gas de proceso. Los materiales del reformador deben seleccionarse tomando en cuenta que la pared de los tubos del reformador tendrá una temperatura máxima de  $900^\circ\text{C}$ .

La Tabla I muestra una comparación de datos de un reformador convencional con el reformador utilizado en esta planta.

Tabla I. Comparación de datos de un reformador convencional con uno calentado por medio de helio [8].

Parámetro	Planta convencional	Planta nuclear
Longitud del Tubo [m]	8-12	10-12
Diámetro interno [mm]	100-150	$\approx 100$
Espesor de la pared [mm]	15-20	$\approx 15$
Tubo de retorno de gases de proceso	Fuera del tubo reformador	Dentro del tubo reformador
Presión de reformación [MPa]	0.1-2.5	4
Temperatura de reformación [ $^\circ\text{C}$ ]	800-850	800-850
Transferencia de calor	Radiación	Convección
Densidad de tubos [tubos/ $\text{m}^2$ ]	$< 1$	45

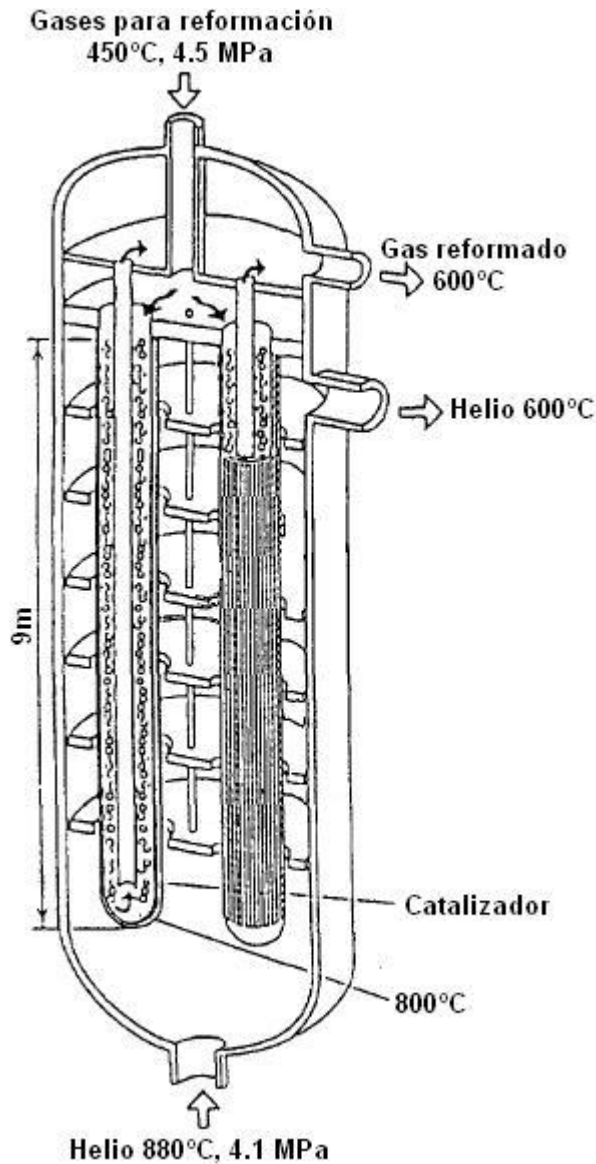
Parámetro	Planta convencional	Planta nuclear
Temperatura máxima de calor [°C]	1400-1500	950
Temperatura máxima en la pared del tubo.	900-950	900
Diferencia máxima de presión a través de la pared del tubo [MPa]	0-2.5	0.1 (parte caliente) 0.4 (parte fría)
Razón H <sub>2</sub> O : CH <sub>4</sub>	2:1 - 5:1	2:1 - 5:1
Flujo medio de calor [Kw/m <sup>2</sup> ]	80	70 - 80
Tasa de gases de proceso [(Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> +CO)/(m <sup>2</sup> s)]	14	14
Vida útil [h]	100,000	100,000

La experiencia en la construcción y operación ganada en el proyecto EVA-I y EVA-II en el Centro de Investigación de Jülich, demostraron que el reemplazo del catalizador es difícil debido a la presencia de un tubo de retorno interno. Se encontró que el uso de un aspirador es ineficaz. Un nuevo sistema hidráulico desarrollado en Jülich redujo el tiempo de reemplazo del catalizador a unos cuantos minutos [9].

El diseño de referencia del reformador de vapor alemán de 60 MW de la Planta Prototipo de Calor de Proceso Nuclear PNP (Prototypanlage Nukleare Prozeßwärme) consiste en aproximadamente 200 tubos de reformación individuales. El helio a 950°C entra en la vasija de presión del reformador a través de un tubo horizontal corto. Con una temperatura de salida de 720°C, el helio se dirige a través de un tubo coaxial hacia el generador de vapor. Después de salir del generador de vapor a una temperatura de 300°C, el flujo de helio regresa por el tubo externo del tubo coaxial para regresar al reactor nuclear.

En el lado secundario del reformador, entra una mezcla de vapor-metano con una proporción de 4:1 a una temperatura de 330°C y se distribuye a todos los tubos del reformador. El gas de alimentación es calentado por recuperadores a 560°C antes de entrar a la sección del catalizador donde por último alcanza una temperatura de 810°C, mientras es reformado al mismo tiempo. El gas caliente producido se enfría al pasar por los recuperadores y abandona el reformador a una temperatura de 480°C.

El modelo empleado por JAERI se muestra en la Figura 21, con este modelo el JAERI estima una tasa de producción de hidrógeno de aproximadamente 3800Nm<sup>3</sup>/h (metros cúbicos normalizados por cada hora) con una entrada de calor de 10 MW [10].



**Figura 21. Reformador desarrollado por JAERI [11].**

La instalación del generador de vapor, como un enfriador de la reacción endotérmica después de pasar por el reformador, fue incorporado para proporcionar un control estable en el comportamiento del sistema [12].

### **3.4 Acoplamiento de la Planta de Reformación de Metano con el HTTR.**

Para realizar el acoplamiento del HTTR con la planta de reformación de metano fue necesario remover el SPWC y colocar dos válvulas de aislamiento después del intercambiador de calor. También fue necesario conocer las formas en que actúan los sistemas de seguridad del reactor HTTR; es por esto que el generador de vapor se colocó a la salida del reformador de vapor.

La producción de hidrógeno por reformación de metano es una tecnología madura dentro de las plantas comerciales para la producción de hidrógeno. Sin embargo, para el acoplamiento de estas dos tecnologías es necesario desarrollar tecnologías relacionadas con la seguridad.

La planta de producción de hidrógeno cuenta con una línea de nitrógeno que se utiliza en el arranque y paro de la planta de reformación de metano, la función de esta línea de nitrógeno es la de purgar los tubos para evitar una atmósfera de aire (que puede resultar explosiva al inyectar el metano) por una atmósfera inerte y seca. Se inyecta poco a poco el metano y vapor de agua la reformador mientras se disminuye el flujo de nitrógeno hasta que se logra cerrar completamente el suministro de nitrógeno y se tiene una mezcla de metano y vapor de agua mientras tanto; el helio sale del reactor a una temperatura promedio de 900°C con una presión de 4 MPa y llega al intercambiador de calor donde cede parte de su calor a un circuito secundario de helio. El helio del circuito primario sale del intercambiador de calor a una temperatura de 250°C y regresa al reactor nuclear para elevar de nuevo su temperatura. Por otra parte, el helio del lazo secundario sale a una temperatura de 850°C, fluye a través de las válvulas de aislamiento VCHe01 y llega al reformador, cede calor para la reacción de reformación y sale a una temperatura de 600°C hacia el generador de vapor. En el generador de vapor cede su calor y sale a una temperatura de 200°C y a una presión de 2MPa. Después entra a un compresor donde se eleva la presión a 4MPa, regresa a través de otra válvula de aislamiento VCHe02 y llega al intercambiador de calor para elevar la temperatura y repetir el ciclo.

#### **3.4.1. Mitigación de perturbaciones térmicas al reactor [13].**

El cambio de temperatura en el lazo de helio secundario que entra al intercambiador de calor, causa un cambio de temperatura en el lazo de helio primario que entra al reactor. Para prevenir un SCRAM debido a una perturbación térmica, es necesario controlar la temperatura de lazo secundario de helio, dentro de un rango aceptable al entrar al intercambiador de calor. Un generador de vapor fue instalado a la salida del reformador de vapor para mantener estable la temperatura causada por una fluctuación o una pérdida de reacción química en el reformador de vapor; el generador de vapor trabaja como un absorbedor térmico. La temperatura del helio que sale del generador de vapor se puede mantener constante e igual a la temperatura de saturación del vapor, controlando la presión del generador de vapor.

#### **3.4.2. Variaciones de presión en las paredes de los tubos del reformador [13].**

La pared de los tubos del reformador está diseñada de acuerdo a la diferencia de presión que existe entre el gas de helio secundario y el gas de proceso de la mezcla de metano y vapor. Para asegurar la integridad estructural de los tubos del reformador bajo cualquier condición, no sólo de apagado o de encendido normal, sino también en una pérdida de reacción química en el reformador de vapor, se instaló un sistema de control para mantener la diferencia de presión dentro de un rango aceptable. En este sistema, la presión del gas de proceso es controlada según el cambio de presión del helio secundario.

El acoplamiento de ambas plantas, el reactor HTTR y la planta de reformación de metano se muestra en la Figura 22.

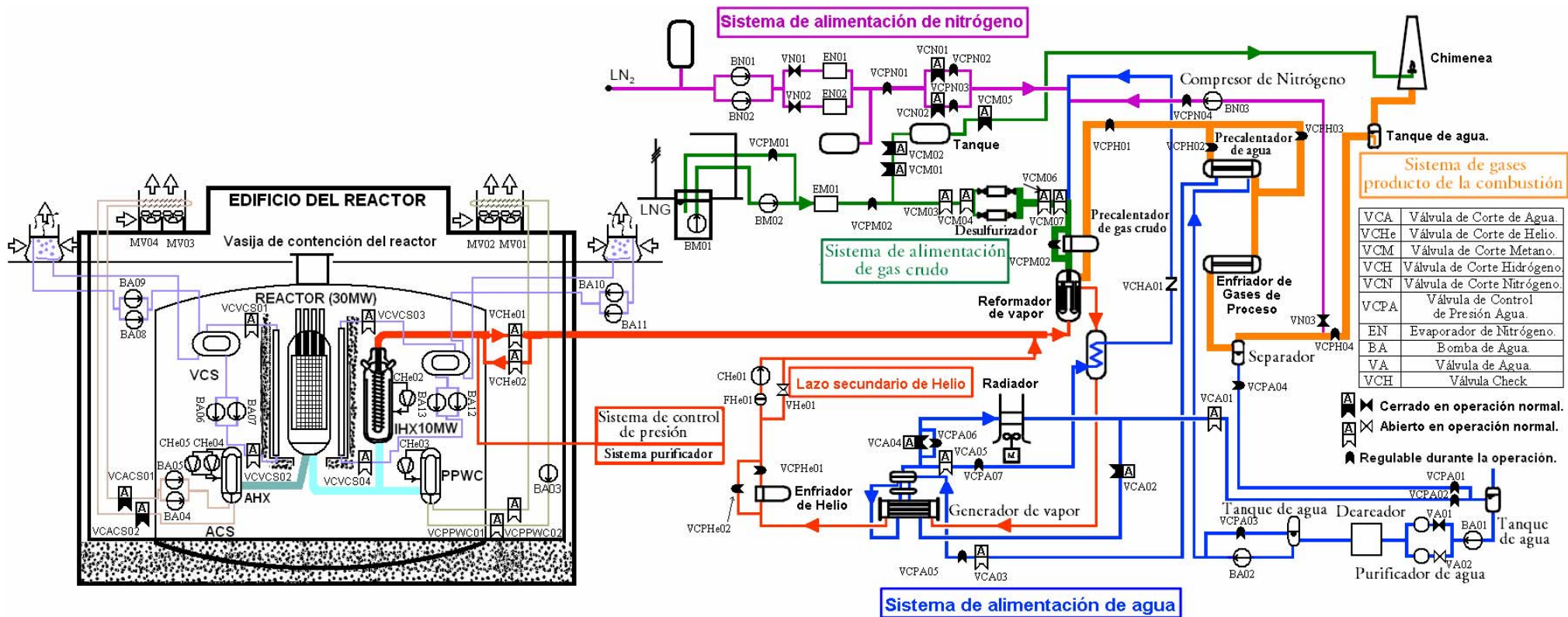


Figura 22. Diagrama de tubería e instrumentación de la planta de reformación de metano acoplada al HTTR.

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE SECUENCIAS DE ACCIDENTE DE LA PLANTA DE REFORMACIÓN DE METANO ACOPLADA AL HTTR.

Para poder identificar los eventos iniciadores, primero se desarrolló una tabla en la cual se describieron las posibles consecuencias al presentarse diferentes desviaciones de la operación normal. Se aplicó la técnica HAZOP a la planta química y al reactor, en el análisis de los árboles de eventos sólo se consideraron los eventos iniciadores que podrían originar un estado final perjudicial para la salud. Esto es porque la mayoría de los eventos que podrían ocurrir en la planta química sólo resultan en daño a la planta sin afectar a la salud del público ni del personal en sitio.

### 4.1. Aplicación de la Técnica HAZOP.

Al diagrama de la Figura 22 se le aplicó la técnica de HAZOP, separando cada línea de flujo por un color de acuerdo al diagrama. En el caso del helio se separaron en tres flujos: el que sale del reactor hacia el MCS, el que va hacia el ACS y el del lazo secundario de helio que sale del intercambiador de calor hacia la planta química. La Tabla II muestra los resultados de la técnica HAZOP, los colores de la Tabla II están relacionados con los colores del diagrama de la Figura 22.

**Tabla II. Aplicación del método HAZOP por líneas a una planta de reformación de metano con vapor acoplada a un HTTR.**

<b>Palabra Guía</b>	<b>Posible Causa</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Acción Sugerida</b>
1.- Menos Flujo.	Fuga de gas de proceso. (Hidrógeno)	Acumulación de una mezcla explosiva (si se encuentra en un lugar cerrado).	Detector. Válvulas de alivio en el edificio contenedor.
2.- Menos Flujo.	Ruptura de la línea de Helio en el reformador.	Pérdida de refrigerante, sobrecalentamiento del intercambiador de calor.	Sensores que permitan detectar una fuga. Corte de las líneas de Helio del circuito de gas de alimentación.
3.- Menos Flujo	Fuga del lazo de regreso de Helio	Elevación de temperatura en el intercambiador de calor, elevación de temperatura en el circuito primario de Helio.	Detectores de nivel de flujo, apagado del reactor, cierre de las válvulas de aislamiento, cierre de gas de alimentación y agua, activación del sistema auxiliar de refrigeración, válvulas de venteo.

<b>Palabra Guía</b>	<b>Posible Causa</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Acción Sugerida</b>
4.- Menos Flujo.	Falta de suministro de agua de alimentación.	Ruptura térmica del metano, acumulación de carbón en los tubos del reformador.	Sistema de respaldo de agua de alimentación.
5.- Menos Presión.	Accidente de pérdida de presión. Ruptura en la línea de nitrógeno.	En caso de ser necesario el apagado normal de la planta, no se podría utilizar para purgar y se tendría que ventear el metano y posiblemente el catalizador se dañe por la condensación del vapor. Si está en paro la planta no se podrá poner en marcha hasta contar con esta línea.	Detectores de fugas y controladores de presión, válvulas de venteo hacia la chimenea.
6.- Menos Flujo.	Ruptura de la línea de gas natural (metano).	Acumulación de una mezcla inflamable y posible explosión.	Dispositivos apropiados de detección, suficiente distancia de seguridad, arreglo apropiado de salto del refrigerante secundario, pared para amortiguar una explosión, válvulas de aislamiento de plantas.
7.- Corrosión.	Fuga de tubos del reformador.	Contaminación.	Investigación en materiales.
8.- Menos Presión	Ruptura en la línea de helio.	Pérdida de refrigerante, fuga de FP, oxidación de las estructuras internas de grafito del núcleo.	Barreras contra liberación de productos de fisión, sistema de purificación de aire, aislamiento de la CV
9.- Menos Flujo	Ruptura de la línea de agua del VCS	Calentamiento de la pared de concreto que rodea a la RPV.	Detectores de nivel de flujo o de presión.

<b>Palabra Guía</b>	<b>Posible Causa</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Acción Sugerida</b>
10.- Menos Flujo	Ruptura de la línea de agua presurizada del ACS.	En estado de operación, este sistema no se encuentra en funcionamiento, en caso de un paro de emergencia no se podrá utilizar el ACS, si la ruptura se encuentra en el AHX, el agua podría ingresar al núcleo del reactor.	Detectores de flujo y presión, sistema de respaldo del ACS.
11.- Menos Flujo	Ruptura de la línea de agua presurizada del sistema principal de enfriamiento (MCS).	Pérdida de refrigerante en el PWCS, elevación de temperatura. Si la ruptura es dentro del PWCS se tiene un ingreso de agua al núcleo del reactor, incremento de reactividad, oxidación de estructuras internas de grafito, liberación de productos de fisión, posible producción de hidrógeno dentro del reactor y en consecuencia explosión.	Válvulas de aislamiento de alimentación de agua al PWCS, detectores de presión,

Después de analizar cada línea con la ayuda del HAZOP, se eligieron aquellos eventos en los que se vería afectada la salud pública, resultando en importancia tres eventos: la ruptura de la línea de metano, la ruptura de la línea de helio que sale de la vasija presurizada del reactor y la ruptura de un tubo de transferencia de calor del PPWC, que corresponden a los eventos 6, 8 y 11 de la Tabla II. El evento iniciador 6 corresponde a una ruptura en la línea de metano y que podría traer como consecuencias una explosión e incendio, el evento iniciador 8 corresponde a una ruptura en la línea de metano del circuito primario que podría traer como consecuencias pérdida de refrigerante en el reactor y liberación de productos de fisión al ambiente y por último el evento iniciador 11 debido a una ruptura de un tubo de transferencia de calor dentro del PPWC traería como consecuencias un ingreso de agua al núcleo del reactor y posiblemente producción de hidrógeno dentro de la vasija y en consecuencia una explosión. Estos tres eventos afectarían a la salud humana. Las fallas de estos eventos se postularon en el lugar donde se espera que la falla cause el mayor daño, sin perder de vista la objetividad del análisis.



A continuación se desarrolló cada evento iniciador para construir sus árboles de eventos y de fallas y posteriormente evaluarlos.

#### 4.2. Ruptura de Tubería de Metano (RU-ME).

Este evento se eligió debido a que se maneja metano, el cual es potencialmente explosivo y de acuerdo a resultados obtenidos en un estudio previo [14] podría generar efectos importantes sobre el personal ocupacionalmente expuesto y el público en general.

La falla considera una ruptura total en la línea de metano localizada en el lugar que provocaría un mayor daño. En esta falla se cuenta con un flujo nominal de 1400Kg/h, y debido a que la falla es una ruptura total, se supone que éste es el flujo de la fuga. La única forma de detener el flujo es parando la bomba BM01 (ver Figura 23).

##### 4.2.1. Ubicación y descripción de la falla.

En este evento se tiene una ruptura de la línea de metano, la cual se muestra en la Figura 23; se encuentra ubicada entre el evaporador EM01 y la válvula de control de presión VCPM02. Al detectarse una diferencia de presión se manda parar la bomba BM01, el modo de falla de la bomba BM01 es que falle a parar, esto podría ser debido a que el interruptor de paro de la bomba se quedó pegado. Por otra parte, el efecto en el reactor es que todo el flujo de helio del reactor se envía al PPWC, el cual está diseñado para disipar los 30 MW del reactor.

Si por alguna razón no se lograra desviar el flujo de helio, o en caso de ser necesario se tuviera que realizar un SCRAM, el MCS se detiene y entra en funcionamiento el ACS y el VCS, los cuales remueven el calor de decaimiento del reactor.

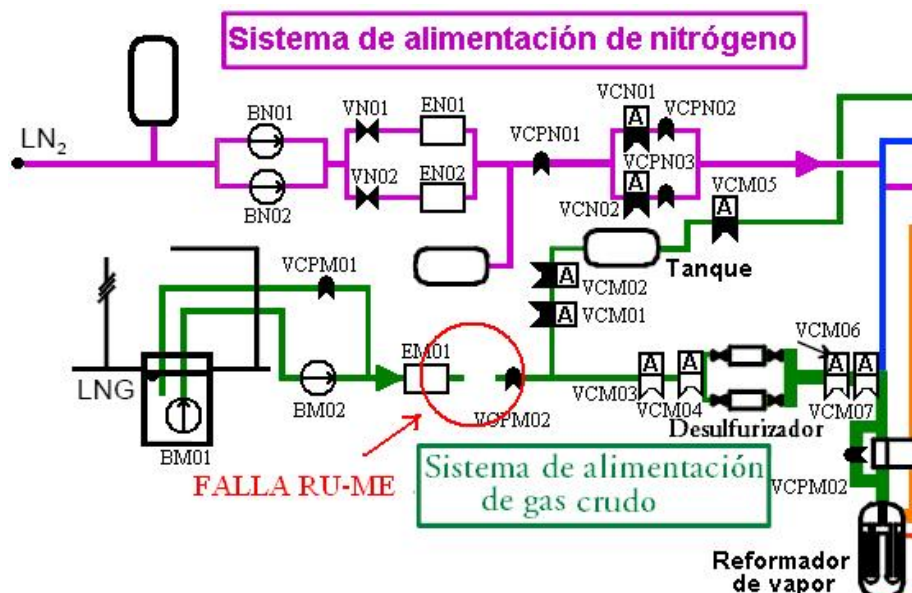
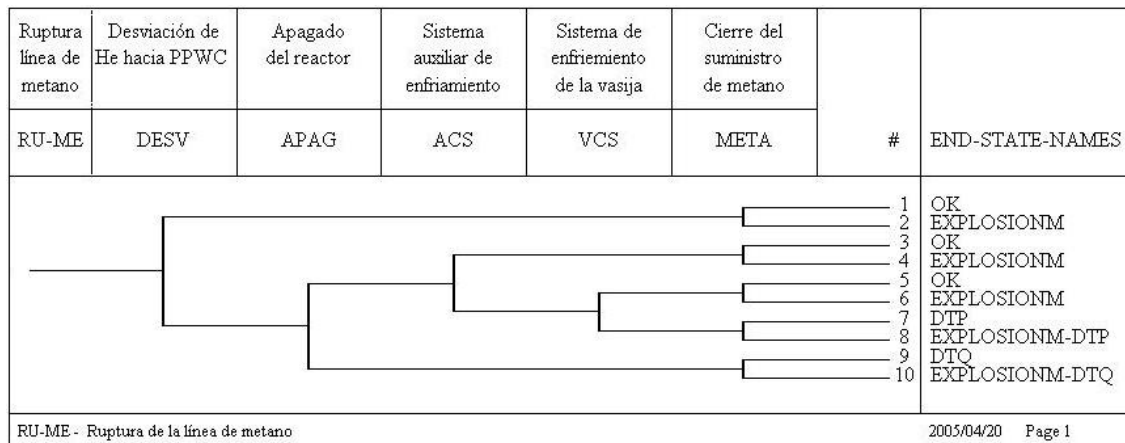


Figura 23. Ubicación de la falla RU-ME.

#### 4.2.2. Resultados del análisis para el evento iniciador RU-ME.

Con la ayuda de la descripción de los principales sistemas del HTRR, de la planta de reformación de metano, del diagrama de la Figura 22 y del HAZOP, se construyó el árbol de eventos con SAPHIRE, el cual se muestra en la Figura 24.



**Figura 24. Árbol de eventos para el evento iniciador RU-ME.**

En el árbol de eventos se puede apreciar al evento iniciador que es la ruptura de la línea de metano RU-ME, y en el encabezado, se notan los sistemas que deben entrar al darse el evento iniciador; como el desvío del helio, el apagado del reactor, el arranque del sistema auxiliar de enfriamiento, etc.

Dependiendo de la secuencia de accidente, las ramas del árbol dan lugar a estados finales que se muestran del lado derecho de la Figura 24.

Los posibles estados finales que se pueden tener son:

<b>EXPLOSIONM</b>	Explosión en la planta química debida a acumulación de metano.
<b>DTP</b>	Daño térmico parcial al reactor debido a que se logró apagar el reactor pero no entró ningún sistema de enfriamiento.
<b>DTQ</b>	Daño térmico a la planta química, sobre todo en la parte en que el helio del circuito secundario está en contacto con el reformador, debido a que el flujo de metano es nulo, los tubos del reformador se calientan, aunque se tiene el caudal de vapor de proceso y el generador de vapor, no se puede mitigar el daño a los tubos del reformador ya que el generador de vapor se encuentra después de haber pasado por el reformador y el flujo de vapor no logra remover el calor total del helio.

Para calcular la frecuencia de cada secuencia de accidente se construyeron árboles de fallas, uno por cada sistema de mitigación mostrado en el encabezado del árbol de eventos.

Las tasas de falla de cada dispositivo que conforman los árboles de fallas fueron obtenidas de varias fuentes, una de ellas fue una guía para datos de confiabilidad de

equipo de proceso [5]. La falla del operador y de la inserción de barras de control fueron tomadas de un reporte sobre la experiencia operacional de un reactor nuclear enfriado por gas parecido al HTTR [6] y la falla de varios componentes del reactor y la falla a parar de la bomba de metano BM01 se tomaron de la base de datos propuesta en la Guía de APS [15]. En el anexo A se puede observar las probabilidades de fallas utilizadas en el análisis. La falla a parar la bomba de metano se considera que es debido a que el interruptor no cambie de posición en la demanda. Los valores utilizados son valores promedios y se muestran en el anexo A.

Una vez evaluados los árboles de falla, se generaron las probabilidades de falla de cada sistema; en la Tabla III se muestran los resultados de probabilidad de falla de cada sistema involucrado en el árbol de eventos del evento iniciador RU-ME, los árboles de fallas se muestran en el anexo B. En la tabla III se muestran los resultados de la frecuencia la cual representa la probabilidad puntual, incluyendo el promedio (mean), la mediana y los intervalos de confianza (5% y 95%).

**Tabla III. Probabilidad de falla de cada sistema en el evento RU-ME.**

Fault Tree	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc	Size Trunc
VCS	1.015E-02	1.040E-02	5.607E-03	9.108E-03	1.980E-02	1.000E-20	--
ACS	8.452E-03	7.522E-03	2.038E-03	5.081E-03	1.829E-02	1.000E-20	--
DESV	2.780E-04	2.887E-04	1.352E-05	1.304E-04	1.064E-03	1.000E-20	--
META	2.780E-04	2.887E-04	1.352E-05	1.304E-04	1.064E-03	1.000E-20	--
APAG	4.816E-06	4.902E-06	4.029E-07	2.323E-06	1.647E-05	1.000E-20	--

Se puede observar que la probabilidad de falla más pequeña es la del sistema APAG, que consiste en apagar el reactor; esto se debe a que se cuentan con varios sistemas de respaldo para lograr apagar el reactor de manera segura.

Una vez obtenidas las probabilidades de falla de cada sistema que forma parte del árbol de eventos, se cuantificaron las frecuencias de las secuencias de accidentes. Agrupando las secuencias por las consecuencias, se obtuvieron las frecuencias presentadas en la Tabla IV para los distintos estados finales de este árbol de eventos.

La frecuencia de ocurrencia de la Tabla IV está dada en fallas por cada año. Como se puede apreciar en este caso, algunas de las frecuencias de ocurrencia son muy pequeñas, si las comparamos por ejemplo con la frecuencia de fundición del núcleo de un reactor nuclear típico de agua ligera, cuyo valor es alrededor de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$ .

**Tabla IV. Frecuencia de ocurrencia de cada estado final del evento RU-ME.**

End State	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc
EXPLOSIONM	6.533E-08	6.924E-08	3.364E-09	3.003E-08	2.666E-07	1.000E-20
DTP	5.815E-12	5.593E-12	1.622E-13	1.412E-12	1.828E-11	1.000E-20
DTQ	3.147E-13	2.608E-13	3.907E-15	6.277E-14	1.009E-12	1.000E-20
EXPLOSIONM-DTP	1.617E-15	1.429E-15	7.097E-18	1.900E-16	4.861E-15	1.000E-20
EXPLOSIONM-DTQ	8.748E-17	8.602E-17	2.087E-19	7.436E-18	2.593E-16	1.000E-20
TOTALS =	6.534E-08	6.925E-08				

### 4.3. Ruptura de Línea de Helio (RU-HE), Accidente de Despresurización.

Este evento es considerado por los diseñadores del HTTR como el peor evento, al cual le llaman accidente de despresurización. Consiste en una ruptura total del tubo coaxial que va hacia el PPWC y el intercambiador de calor. Esta ruptura provocaría que el refrigerante saliera de la vasija presurizada dejando al reactor sin refrigerante, de tal modo que el ACS se inhabilita y la única forma de remover el calor residual es por medio del VCS.

#### 4.3.1. Ubicación y descripción de la falla.

La falla se encuentra ubicada en la boquilla de la vasija presurizada del reactor (RPV), tal y como se ilustra en la Figura 25. Al ser detectada una diferencia de presión se realiza el SCRAM, el refrigerante es liberado a la contención de la vasija (CV) y se cierran las válvulas de aislamiento de la contención de la vasija, para evitar la fuga de los productos de fisión, aunque una pequeña cantidad se fuga a la atmósfera a través del área de servicio por el incremento de presión en la contención de la vasija. Para prevenir la entrada de aire dentro del núcleo se inhibe el funcionamiento del ACS; el calor de decaimiento es removido por radiación a través del VCS. Cuando la presión dentro del núcleo y de la mezcla de helio/aire que se encuentra en la contención de la vasija es la misma, el aire entra al núcleo por convección natural y oxida las estructuras de grafito hasta que el VCS enfría a la vasija presurizada del reactor (RPV) y la reacción de oxidación se termina.

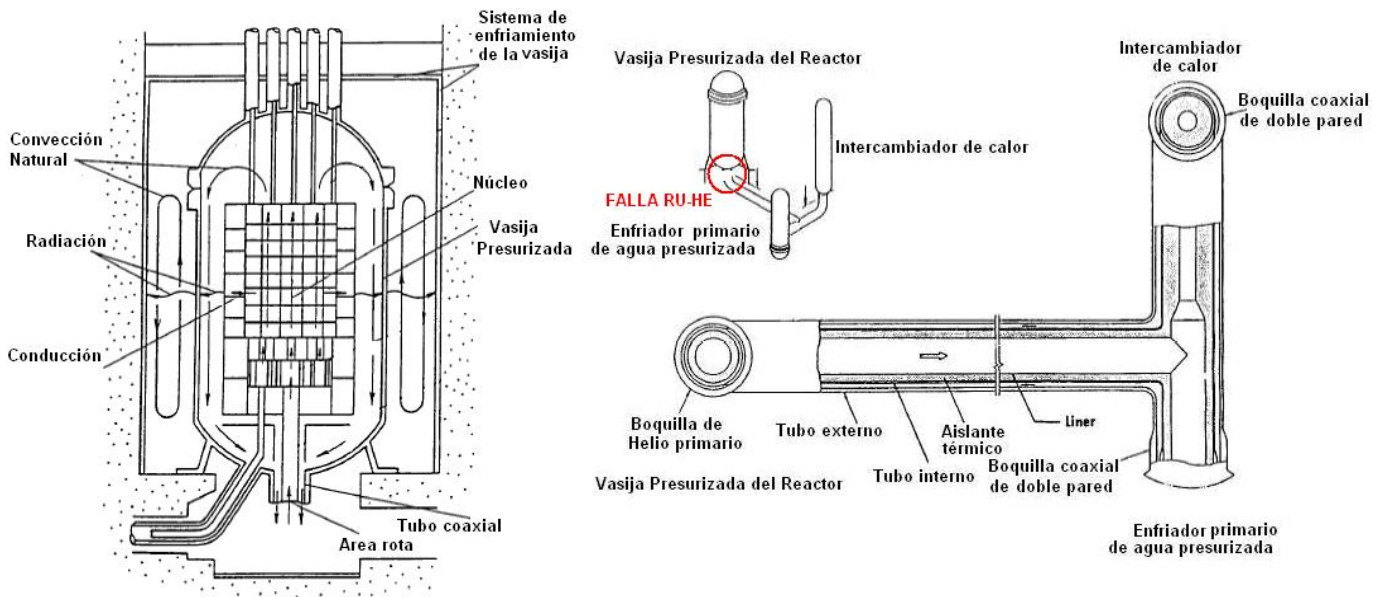


Figura 25. Ubicación de la falla RU-HE.

#### 4.3.2. Resultados del análisis para el evento iniciador RU-HE.

Se hicieron fallar los diferentes sistemas de mitigación para dar lugar al árbol de eventos de la Figura 26. El sistema de cierre de la válvula de aislamiento de la contención evita la salida de los productos de fisión fuera de la contención de la vasija.

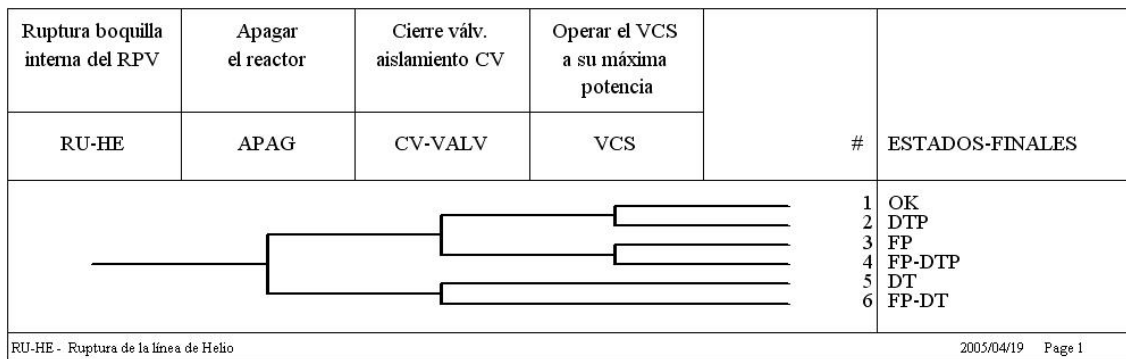


Figura 26. Árbol de eventos para el evento iniciador RU-HE.

Los estados finales para el evento iniciador RU-HE son:

<b>DTP</b>	Daño térmico parcial, debido a que se logró apagar el reactor pero el VCS falló a arrancar, por lo cual el reactor se enfriará por convección natural.
<b>FP</b>	Liberación de productos de fisión al ambiente a través del área de servicio, debido a que no se logró aislar la contención de la vasija y se incrementó la presión en la contención de la vasija.
<b>DT</b>	Daño térmico total debido a que no se logró apagar el reactor, como no hay SCRAM el VCS no se activa.

El diseño del reactor HTTR tiene una retroalimentación negativa de reactividad, debido al efecto Doppler del combustible, logrando alcanzar 1600°C como temperatura máxima.

Los sistemas VCS y APAG tienen las mismas probabilidades de falla que para el evento RU-ME, ya que se considera el mismo evento tope con el mismo criterio de éxito. El sistema CV-VALV interviene en este árbol de eventos y el de RU-PPWC. En la Tabla V se muestran los resultados de la probabilidad de falla de cada sistema del evento iniciador RU-HE.

**Tabla V. Probabilidad de falla de cada sistema en el evento RU-HE.**

Fault Tree	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc	Size trunc
VCS	1.015E-02	1.040E-02	4.730E-03	9.056E-03	2.117E-02	1.000E-15	--
CV-VALV	2.828E-04	2.936E-04	1.894E-05	1.282E-04	1.041E-03	1.000E-15	--
APAG	4.816E-06	4.914E-06	4.176E-07	2.363E-06	1.759E-05	1.000E-15	--

El sistema con una mayor probabilidad de falla es el VCS, que se encarga de remover el calor de decaimiento, por otra parte el sistema CV-VALV es la válvula que se encarga de aislar la contención de la vasija del área de servicio. La contención de la vasija está formada de acero y tiene un espesor de 30 mm.

Una vez evaluados los árboles de fallas se evaluó la frecuencia de ocurrencia de los estados finales, los cuales se muestran en la Tabla VI.

**Tabla VI. Frecuencia de ocurrencia de cada estado final del evento RU-HE.**

End State	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc	Size Trunc
DTP	2.151E-07	2.170E-07	9.765E-08	1.854E-07	4.258E-07	1.000E-15	--
FP	5.996E-09	5.150E-09	3.774E-10	2.516E-09	1.926E-08	1.000E-15	--
DT	1.021E-10	1.124E-10	8.336E-12	4.711E-11	3.812E-10	1.000E-15	--
FP-DTP	6.108E-11	5.885E-11	3.464E-12	2.676E-11	2.265E-10	1.000E-15	--
FP-DT	2.839E-14	2.448E-14	3.732E-16	6.267E-15	9.316E-14	1.000E-15	--
TOTALS =	2.213E-07	2.223E-07					

El evento con una mayor frecuencia es el DTP, que se refiere a un daño térmico parcial, esto debido a que el reactor se logra apagar pero el VCS no arrancó y el reactor se enfriará por convección natural.

#### 4.4. Ruptura de un Tubo de Transferencia de Calor Dentro del PPWC (RU-PPWC).

Este evento tiene su importancia debido a que en caso de entrar una gran cantidad de agua en el reactor, primero se corre el riesgo de debilitar las estructuras internas de grafito y además si el reactor no se apaga se produciría hidrógeno dentro de la vasija presurizada del reactor, concluyendo en una posible explosión.

##### 4.4.1. Ubicación y descripción de la falla.

En el caso de una falla de un tubo de transferencia de calor dentro del PPWC (ver Figura 27), el agua presurizada ingresa dentro del circuito primario de helio y se evapora debido al calor residual de las estructuras internas del reactor. El agua que ingresa dentro del núcleo del reactor causa oxidación del grafito, además de aumentar la reactividad.

Se realiza un SCRAM al detectar un decremento en la presión entre el gas primario de helio y el agua presurizada. Simultáneamente, el PPWC es aislado de la bomba de agua mediante una válvula de aislamiento, para prevenir un mayor ingreso de agua dentro del núcleo del reactor.

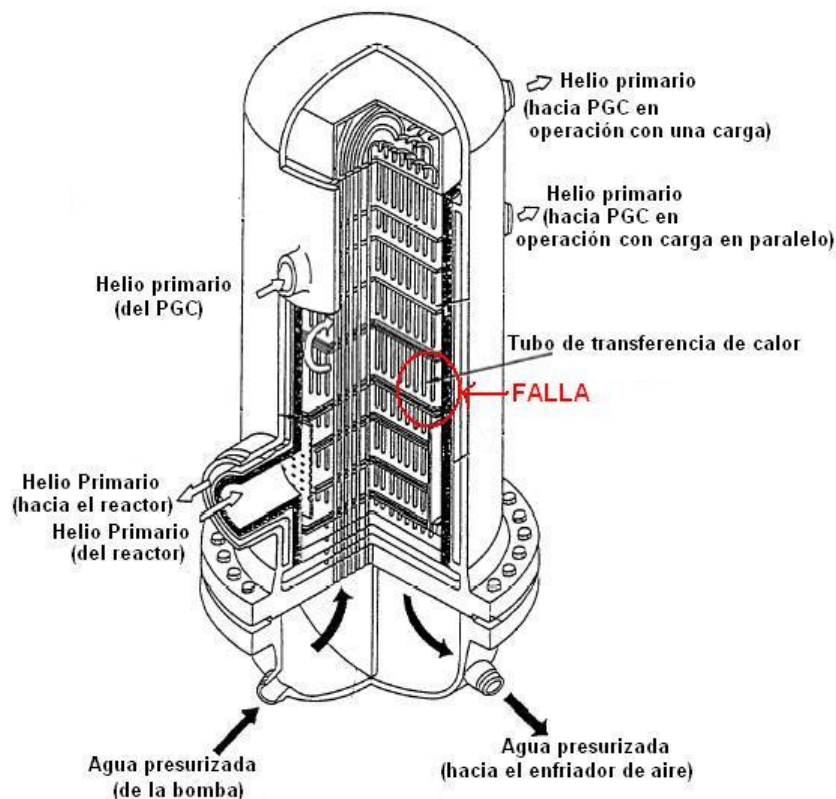
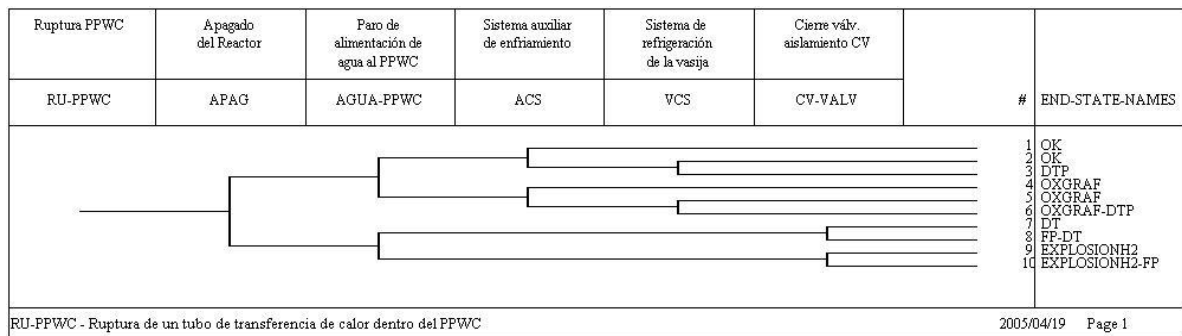


Figura 27. Ubicación de la falla RU-PPWC.

#### 4.4.2. Resultados del análisis para el evento iniciador RU-PPWC.

Al hacer fallar los sistemas de mitigación para este evento, se creó el árbol de eventos mostrado en la Figura 28, teniendo como estados finales:

<b>DTP</b>	Daño térmico parcial debido a que el ACS y el VCS fallaron al arrancar.
<b>OXGRAF</b>	Se refiere a la oxidación del grafito debido al agua que ingresa al reactor.
<b>EXPLOSIONH2</b>	Debido a la generación y acumulación de hidrógeno dentro del núcleo del reactor se produce una explosión de hidrógeno dentro de la vasija del reactor.
<b>EXPLOSIONH2-FP</b>	Igual al estado final anterior pero no se logra aislar la contención de la vasija y los productos de fisión son liberados al ambiente.



**Figura 28. Árbol de eventos para el evento iniciador RU-PPWC.**

Las probabilidades de falla de los sistemas de mitigación de la Tabla VII son las mismas que se mostraron en la Tabla II y V, la diferencia es que interviene el sistema AGUA-PPWC en este árbol de eventos.

**Tabla VII. Probabilidad de falla de cada sistema en el evento RU-PPWC.**

Fault Tree	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc	z	#
VCS	1.015E-02	9.958E-03	4.487E-03	8.744E-03	1.875E-02	1.000E-15	-	-
ACS	8.452E-03	6.992E-03	1.940E-03	4.871E-03	1.704E-02	1.000E-15	-	-
AGUA-PPWC	4.672E-03	4.448E-03	1.287E-03	3.727E-03	1.070E-02	1.000E-15	-	-
CV-VALV	2.828E-04	2.697E-04	1.815E-05	1.207E-04	1.025E-03	1.000E-15	-	-
APAG	4.816E-06	4.630E-06	3.848E-07	2.270E-06	1.762E-05	1.000E-15	-	-

Views:  Description  Base Case  Base Case Unc.  Current Vs. Base  Current Case  Current Case Unc.

Report Exit



Por último se evaluó el árbol de eventos para obtener las frecuencias de ocurrencia de cada estado final, mostradas en la Tabla VIII.

**Tabla VIII. Frecuencia de ocurrencia de cada estado final del evento RU-PPWC.**

The screenshot shows the 'EndState Review - (RU-PPWC)' window. At the top, there are two dropdown menus: 'Sort Order' set to 'Current min cut frequency' and 'Analysis Type' set to 'RANDOM'. Below these is a table with the following data:

End State	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc
OXGRAF	2.336E-06	2.286E-06	6.406E-07	1.747E-06	5.518E-06	1.000E-20
DTP	4.450E-08	3.629E-08	8.873E-09	2.449E-08	9.728E-08	1.000E-20
DT	2.408E-09	2.275E-09	1.696E-10	1.092E-09	7.979E-09	1.000E-20
OXGRAF-DTP	2.082E-10	1.661E-10	1.859E-11	8.934E-11	4.822E-10	1.000E-20
EXPLOSIONH2	1.127E-11	1.211E-11	5.365E-13	4.326E-12	4.380E-11	1.000E-20
FP-DT	6.811E-13	6.612E-13	8.829E-15	1.465E-13	2.813E-12	1.000E-20
EXPLOSIONH2-FP	3.186E-15	2.810E-15	2.698E-17	5.402E-16	1.181E-14	1.000E-20
TOTALS =	2.383E-06	2.325E-06				

At the bottom of the window, there is a 'Views' section with radio buttons for 'Description', 'Base Case', 'Base Case Unc.', 'Current Vs. Base', 'Current Case' (which is selected), and 'Current Case Unc.'. To the right of the views are two buttons: 'Report' and 'Exit'.

En el capítulo 5 se presentan los resultados de la importancia de los eventos, las contribuciones de las fallas de los componentes a la frecuencia de accidente, y análisis de sensibilidad sobre algunos dispositivos.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS.

Después de construir y evaluar los árboles de eventos y de fallas, se agruparon en un solo proyecto en SAPHIRE para poder comparar las importancias de los dispositivos a la frecuencia total de accidente.

### 5.1. Resultados Generales

En la Tabla IX y X se muestran la probabilidad de falla de cada sistema y la frecuencia de ocurrencia de cada estado final ordenados en forma descendente.

**Tabla IX. Probabilidad de falla de cada sistema de todos los eventos.**

Fault Tree	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc
VCS	1.015E-02	9.843E-03	4.579E-03	8.872E-03	1.847E-02	1.000E-15
ACS	8.452E-03	6.587E-03	1.974E-03	4.982E-03	1.523E-02	1.000E-15
AGUA-PPWC	4.672E-03	4.470E-03	1.285E-03	3.352E-03	1.155E-02	1.000E-15
CV-VALV	2.828E-04	2.752E-04	1.781E-05	1.466E-04	8.813E-04	1.000E-15
DESV	2.780E-04	2.536E-04	1.345E-05	1.183E-04	9.473E-04	1.000E-15
META	2.780E-04	2.538E-04	1.345E-05	1.183E-04	9.473E-04	1.000E-15
APAG	4.816E-06	5.096E-06	4.158E-07	2.335E-06	1.951E-05	1.000E-15

De la Tabla IX podemos observar que el sistema con una mayor probabilidad de falla es el VCS. Se supuso que las válvulas están en una posición de no completa apertura y las bombas están paradas, aunque comúnmente estas bombas siempre están en operación y las válvulas se encuentran abiertas. Pero para cuantificar la mayor frecuencia de falla se tomaron estos parámetros; aunque el VCS es el sistema con una mayor probabilidad de falla no es el sistema que tiene la mayor aportación a alguna frecuencia de ocurrencia de un estado final que afecte a la salud. El sistema que tiene la mayor aportación a la frecuencia de un accidente con efectos a la salud es el sistema META. La falla o éxito del VCS afecta más a la parte económica.

En la Tabla X se puede apreciar que el estado final con una mayor frecuencia de ocurrencia es OXGRAF, que se refiere a una oxidación en las estructuras internas de grafito de la vasija presurizada del reactor. El análisis está dirigido hacia la seguridad pública, es por eso que sólo se analizaron los eventos que proporcionaron un riesgo a la salud pública.

Observando la Tabla X notamos tres estados finales que provocarían un daño a la población: EXPLOSIONM, EXPLOSIONH2, FP y los mismos con diferentes extensiones como DT, DTP, DTQ. EXPLOSIONM. Este último se refiere a una explosión debido a una acumulación de metano; es el estado final que se originó en

el evento RU-ME, y se podría decir que es un daño a corto alcance, tanto por el tamaño de la población que podría afectar, como por tiempo que permanecen los daños. Otro estado final que afecta a la salud pública es el de FP, que se refiere a una liberación al ambiente de productos de fisión. Éste se clasificó como un daño de largo alcance, ya que en caso de ocurrir, un mayor número de personas resultaría afectado y el tiempo en el que se encuentre latente el riesgo sería mucho mayor que el de EXPLOSIONM. Por último tenemos el estado final EXPLOSIONH2, referido a una acumulación dentro de la vasija de hidrógeno y en consecuencia una explosión, pudiendo traer consigo después de la explosión, una liberación de productos de fisión.

**Tabla X. Frecuencia de ocurrencia de cada estado final de todos los eventos.**

The screenshot shows the 'EndState Review - (HTTR-H2)' window. It features a 'Sort Order' dropdown set to 'Current min cut frequency' and an 'Analysis Type' dropdown set to 'RANDOM'. Below these is a table with 7 columns: 'End State', 'Frequency', 'Mean', '5th', 'Median', '95th', and 'Prob Trunc'. The table lists various end states such as OXGRAF, DTP, EXPLOSIONM, FP, DT, and their combinations, along with a 'TOTALS =' row. At the bottom, there are 'Views' radio buttons for 'Description', 'Base Case', 'Base Case Unc.', 'Current Vs. Base', 'Current Case', and 'Current Case Unc.', along with 'Report' and 'Exit' buttons.

End State	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc
OXGRAF	2.336E-06	2.215E-06	6.559E-07	1.773E-06	5.206E-06	1.000E-20
DTP	2.596E-07	2.468E-07	1.112E-07	2.155E-07	4.821E-07	1.000E-20
EXPLOSIONM	6.533E-08	6.580E-08	3.473E-09	2.762E-08	2.300E-07	1.000E-20
FP	5.996E-09	5.571E-09	3.878E-10	2.788E-09	2.039E-08	1.000E-20
DT	2.510E-09	2.410E-09	2.330E-10	1.171E-09	8.295E-09	1.000E-20
OXGRAF-DTP	2.082E-10	1.782E-10	2.127E-11	9.977E-11	5.335E-10	1.000E-20
FP-DTP	6.108E-11	5.775E-11	3.237E-12	2.463E-11	1.929E-10	1.000E-20
EXPLOSIONH2	1.127E-11	1.120E-11	4.849E-13	4.153E-12	4.558E-11	1.000E-20
FP-DT	7.100E-13	8.922E-13	1.237E-14	1.707E-13	2.916E-12	1.000E-20
DTQ	3.147E-13	3.248E-13	4.790E-15	7.313E-14	1.292E-12	1.000E-20
EXPLOSIONH2-FP	3.186E-15	3.129E-15	2.748E-17	5.445E-16	1.423E-14	1.000E-20
EXPLOSIONM-DTP	1.617E-15	1.706E-15	7.462E-18	1.790E-16	5.345E-15	1.000E-20
EXPLOSIONM-DTQ	8.748E-17	8.782E-17	2.348E-19	8.114E-18	2.598E-16	1.000E-20
TOTALS =	2.670E-06	2.536E-06				

En la Tabla XI se muestra la frecuencia de ocurrencia para algún evento que dañe a la población.

La frecuencia de ocurrencia promedio de un estado final que dañe a la salud es de 6.961E-8/año.

**Tabla XI. Frecuencia de ocurrencia de los estados finales con daño a la salud.**

EndState Review - (HTTR-H2)

Sort Order: Current min cut frequency Analysis Type: RANDOM

End State	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc
EXPLOSIONM	6.533E-08	6.420E-08	3.620E-09	3.198E-08	2.194E-07	1.000E-20
FP	5.996E-09	5.634E-09	3.821E-10	2.561E-09	1.993E-08	1.000E-20
FP-DTP	6.108E-11	6.609E-11	3.329E-12	2.602E-11	2.393E-10	1.000E-20
EXPLOSIONH2	1.127E-11	1.208E-11	5.289E-13	4.126E-12	4.400E-11	1.000E-20
FP-DT	7.100E-13	6.887E-13	9.135E-15	1.534E-13	2.747E-12	1.000E-20
EXPLOSIONH2-FP	3.186E-15	2.802E-15	2.798E-17	5.952E-16	1.143E-14	1.000E-20
EXPLOSIONM-DTP	1.617E-15	1.351E-15	8.714E-18	2.044E-16	5.143E-15	1.000E-20
EXPLOSIONM-DTQ	8.748E-17	1.170E-16	2.870E-19	9.393E-18	3.048E-16	1.000E-20
TOTALS =	7.140E-08	6.991E-08	4.003E-09	3.457E-08	2.396E-07	

Views:  Description  Base Case  Base Case Unc.  Current Vs. Base  Current Case  Current Case Unc.

Buttons: Report, Exit

En la Tabla XII se muestra la jerarquización de los dispositivos de acuerdo a su aportación a algún estado final con daño a la salud.

El dispositivo dominante con una aportación de 91.58% para algún estado final con daños a la salud es la BM01, que es la bomba de metano que alimenta al evaporador y que en caso de una ruptura en la línea de metano se debe mandar parar. Este dispositivo influye en la ocurrencia del estado final de explosión de metano. El siguiente dispositivo que aporta el 8.26% para algún estado final con daños a la salud es el RECIRCULADOR, encargado de hacer circular el aire dentro de la contención de la vasija al área de servicio. Este dispositivo influye en la ocurrencia del estado final de liberación de productos de fisión.

Los dispositivos VCSPA01 y 02 aportan el 0.14% a la ocurrencia de algún estado final con daños a la salud, estas válvulas son las encargadas de aislar la contención de la vasija del área de servicio. Su influencia es sobre el estado final de liberación de productos de fisión.

El 0.02% restante lo aportan IBC, OP, VCPPWC01 y VCPPWC02, los primeros dos se encuentran dentro del sistema que se encarga de apagar el reactor, y VCPPWC01 y VCPPWC02 se encargan de cerrar la entrada de agua presurizada al reactor en caso de una ruptura de un tubo de transferencia de calor en el PPWC. La influencia de estos dispositivos es sobre la ocurrencia de los estados finales de explosión de hidrógeno y de liberación de productos de fisión.

**Tabla XII. Aportación por dispositivo para la ocurrencia de algún estado final con daños a la salud.**

Event Name	# of Occur	Probability	F-V	Risk Reduc. Ratio	Risk Incre. Ratio
RU-ME	1	2.350E-004	9.158E-001	1.187E+001	3.897E+003
BM01	1	2.780E-004	9.158E-001	1.187E+001	3.294E+003
RU-HE	2	2.120E-005	8.405E-002	1.092E+000	3.966E+003
RECIRCULADOR	5	2.780E-004	8.262E-002	1.090E+000	2.981E+002
VCSPA02	3	2.200E-003	1.438E-003	1.001E+000	1.652E+000
VCSPA01	3	2.200E-003	1.438E-003	1.001E+000	1.652E+000
RU-PPWC	18	5.000E-004	1.675E-004	1.000E+000	1.335E+000
IBC	10	2.060E-003	1.675E-004	1.000E+000	1.081E+000
OP	9	2.060E-003	1.475E-004	1.000E+000	1.071E+000
VCPPWC01	4	2.200E-003	7.426E-005	1.000E+000	1.034E+000
VCPPWC02	4	2.200E-003	7.426E-005	1.000E+000	1.034E+000
MPO	5	2.780E-004	1.991E-005	1.000E+000	1.072E+000
BA03	4	2.780E-004	9.384E-006	1.000E+000	1.034E+000
INT	4	2.780E-004	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
INTTMP	8	2.400E-005	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
INTPR	8	2.400E-005	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000

Aunque SAPHIRE no realiza un análisis para visualizar la aportación de los eventos iniciadores sobre los estados finales, con información obtenida de SAPHIRE se obtuvieron estas aportaciones que se muestran en la Tabla XIII.

En primer lugar se encuentra el evento iniciador RU-ME, que se refiere a la ruptura de la línea de metano, con una aportación de 91.5% para la ocurrencia del evento de explosión de metano. En segundo lugar se tiene el evento iniciador RU-HE, que se refiere a una ruptura en la línea de helio con una aportación del 8.48% sobre la ocurrencia del estado final de liberación de productos de fisión y con una aportación de 0.02% se encuentra el evento iniciador RU-PPWC, que es la ruptura de un tubo de transferencia de calor dentro del PPWC y la aportación es sobre los estados finales de explosión de hidrógeno y de liberación de productos de fisión.

**Tabla XIII. Aportación por evento iniciador para la ocurrencia de algún estado final con daño a la salud.**

Sistemas	Porcentaje
META	91.58
CV-VALV	8.40
APAG	0.013
AGUA-PPWC	0.007
<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>

Por último, también con datos proporcionados por SAPHIRE se identificó la aportación de cada sistema a que se tenga un estado final con daño a la salud, los cuales se muestran en la Tabla XIV.

El sistema META ocupa el primer lugar con una aportación del 91.58%, el sistema META es el encargado de detener el suministro de metano, la influencia del sistema META es sobre el estado final de explosión de metano.

En segundo lugar se tiene al sistema CV-VALV, encargado de aislar la contención de la vasija con el área de servicio, su aportación es del 8.4% sobre el estado final de liberación de productos de fisión.

El sistema APAG, encargado de apagar el reactor, ocupa el tercer lugar con una aportación del 0.013% sobre los estados finales de explosión de hidrógeno y de liberación de productos de fisión.

El cuarto lugar lo ocupa el sistema AGUA-PPWC, encargado de detener el suministro de agua presurizada al PPWC, tiene una aportación del 0.007% e influye sobre los estados finales de explosión de hidrógeno y de liberación de productos de fisión.

Se puede observar que de las tablas XII, XIII y XIV, las aportaciones más importantes las tienen el dispositivo, evento iniciador y sistema, que influyen en la ocurrencia del estado final explosión de metano, el cual es el de mayor índice de ocurrencia de los tres estados finales con daño a la salud.

**Tabla XIV. Aportación por sistemas para la ocurrencia de algún estado final con daño a la salud.**

<b>Sistemas</b>	<b>Porcentaje</b>
META	91.58
CV-VALV	8.40
APAG	0.013
AGUA-PPWC	0.007
<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>

Como se vio al inicio de este capítulo, el sistema con una mayor probabilidad de falla es el VCS. Este sistema no influye sobre la frecuencia de ocurrencia de los estados finales con daño a la salud. VCS es un sistema que ayuda a enfriar la pared de la vasija. Cuando no se encuentra disponible el ACS, es el único sistema capaz de enfriar el reactor, siempre y cuando se haya realizado un SCRAM. Debido a que la falla del VCS no lleva a ningún estado final con daño a la salud, se concluye que su falla influye sólo en el daño económico y no en la salud.

Se analizaron los estados finales con daño a la salud llamados EXPLOSIONM, EXPLOSION H2 y FP.

## **5.2. Resultados del Estado Final de Explosión de Metano.**

Como se describió en el evento RU-ME, la falla se encuentra en la línea de metano donde no existe una válvula que pueda detener la fuga de metano; el metano escapa a una razón de 1400Kg/h. En el anexo C se muestra un estudio de radiación térmica debida a un incendio de metano. En este anexo se supone que se logra detener el flujo de metano, pero en el tiempo que se tardó para detener la fuga, se acumula una cierta cantidad de metano. Se supone que esta acumulación de metano se incendia y se analizaron las consecuencias dependiendo del tiempo de

reparación, a 100 metros de distancia desde el centro del incendio. El estudio demostró, que para una distancia de 100 m, existe una acumulación suficiente de metano durante 10 minutos, para ocasionar quemaduras de segundo grado después de 20 segundos de exposición.

Se seleccionaron los tres estados finales que contenían EXPLOSIONM, en la Tabla XV se muestra la frecuencia de ocurrencia del estado final EXPLOSIONM.

**Tabla XV. Frecuencia de ocurrencia del estado final EXPLOSIONM.**

End State	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc
EXPLOSIONM	6.533E-08	7.038E-08	3.806E-09	2.814E-08	2.475E-07	1.000E-20
EXPLOSIONM-DTP	1.817E-15	1.160E-15	8.349E-18	1.892E-16	4.756E-15	1.000E-20
EXPLOSIONM-DTQ	8.748E-17	7.738E-17	2.609E-19	7.853E-18	2.546E-16	1.000E-20
TOTALS =	6.533E-08	7.038E-08	3.806E-09	2.814E-08	2.475E-07	

### 5.3. Resultados del Estado Final de Explosión de Hidrógeno.

En el evento RU-PPWC se consideró una ruptura de un tubo del intercambiador de calor y por lo tanto el agua presurizada entra al núcleo del reactor y empieza a reaccionar con las estructuras internas de grafito. Si no se logra apagar el reactor, las condiciones dentro de la vasija son idóneas para generar hidrógeno por medio de una reacción del agua con el grafito a una temperatura de 1000 °C

La Tabla XVI muestra la frecuencia de ocurrencia de una posible explosión de hidrógeno dentro del RPV

**Tabla XVI. Frecuencia de ocurrencia del estado final EXPLOSIONH2.**

End State	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc
EXPLOSIONH2	1.127E-11	1.130E-11	5.541E-13	4.301E-12	4.268E-11	1.000E-15
EXPLOSIONH2-FP	2.595E-15	3.000E-15	1.377E-17	3.636E-16	1.161E-14	1.000E-15
TOTALS =	1.127E-11	1.130E-11	5.541E-13	4.301E-12	4.268E-11	

#### 5.4. Resultados del Estado Final de Liberación de Productos de Fisión.

El estado final FP consiste de la aportación de los eventos RU-PPWC y RU-HE. En el primer evento se tiene una ruptura de un tubo del intercambiador de calor; el agua de enfriamiento entra a la RPV y reacciona con el grafito, si el reactor no se puede apagar, se genera hidrógeno dentro de la RPV y se llega a una explosión dentro de la vasija. Esta explosión rompe el ducto de helio primario e inclusive la propia vasija presurizada del reactor liberando productos de fisión. Los productos de fisión salen hacia la contención de la vasija y si no son cerradas las válvulas de aislamiento de la contención de la vasija, estos productos de fisión se fugan a través del área de servicio hacia la atmósfera.

En la Figura 29 se muestran las 4 válvulas de aislamiento de la vasija. Un tren siempre se encuentra cerrado, por lo que basta con cerrar la válvula VCSPA01 o VCSPA02 para aislar la vasija; las válvulas no se incluyeron en el diagrama de la Figura 21, pero si se tomaron en cuenta para la realización y evaluación, dentro del sistema CV-VALV.

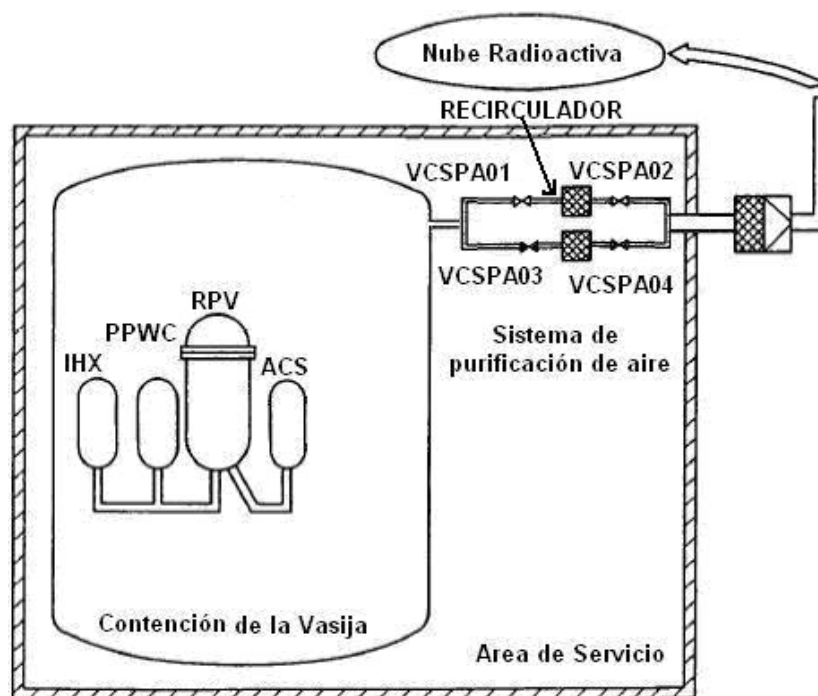


Figura 29. Ruta de liberación de productos de fisión.

Se unieron los estados finales FP y el resultado se muestra en la Tabla XVII



**Tabla XVII. Frecuencia de ocurrencia del estado final FP.**

The screenshot shows the 'EndState Review - (HTTR-H2)' window. At the top, there are two dropdown menus: 'Sort Order' set to 'Current min cut frequency' and 'Analysis Type' set to 'RANDOM'. Below these is a table with the following data:

End State	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc
FP	5.996E-09	5.881E-09	4.024E-10	2.813E-09	2.071E-08	1.000E-15
FP-DTP	6.108E-11	6.502E-11	3.236E-12	2.792E-11	2.432E-10	1.000E-15
FP-DT	7.095E-13	6.791E-13	1.205E-14	1.733E-13	2.481E-12	1.000E-15
EXPLOSIONH2-FP	2.595E-15	2.858E-15	1.127E-17	3.396E-16	1.117E-14	1.000E-15
TOTALS =	6.058E-09	5.947E-09	4.056E-10	2.841E-09	2.095E-08	

At the bottom of the window, there is a 'Views' section with radio buttons for: Description, Base Case, Base Case Unc., Current Vs. Base, Current Case (selected), and Current Case Unc. There are also 'Report' and 'Exit' buttons.

Observando el total de las Tablas XV, XVI y XVII, es posible darse cuenta que el estado final con una mayor frecuencia de ocurrencia es el de explosión de metano, seguido por el de liberación de productos de fisión y por último el de explosión de hidrógeno.

## CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

En este capítulo se presenta el análisis resultante de las modificaciones a los sistemas de mitigación de cada uno de los eventos, ya sea en la tasa de falla de los dispositivos o en la configuración, con el fin de examinar los efectos sobre los resultados.

En todo análisis de seguridad, es esencial identificar aquellos equipos y modos de fallos que tienen un mayor impacto en la seguridad del sistema analizado, es lo que constituye un "Análisis de Importancia" del sistema. Este tipo de análisis permitirá centrar estudios posteriores en aquellos equipos o situaciones que han propiciado los sucesos básicos más importantes, a la vez que marca las pautas a seguir para adoptar las medidas preventivas más eficaces, que obviamente serán sobre aquellos equipos que muestren medidas de importancia más significativas.

SAPHIRE puede calcular siete medidas diferentes de importancia. Éstas son: la importancia Fussell-Vesely, cociente de reducción de riesgo, cociente de incremento de riesgo, Birnbaum o primera derivada de importancia, diferencia de reducción de riesgo, diferencia de incremento de riesgo, y la importancia estructural. Estas medidas de importancia se calculan para cada evento básico para el respectivo árbol de fallas o secuencia de accidente.

Las principales medidas de importancia son:

**Medida de importancia de Fussell-Vesely (F-V):** se define este factor respecto de un componente, como el cociente entre la suma de las probabilidades de todos los conjuntos mínimos que contienen a este componente y la probabilidad total (o suma de la probabilidad de todos los conjuntos mínimos). En esta medida influye tanto la indisponibilidad del componente como su posición estructural en el árbol de fallas. Es una medida de importancia porcentual.

**Reducción de riesgo:** nos indica qué tanto se podría disminuir el límite superior del conjunto mínimo de corte, si el evento básico jamás hubiera ocurrido (típicamente corresponde a que el componente nunca fallará).

**Incremento de riesgo:** nos indica qué tanto podría aumentar el límite superior del conjunto mínimo de corte, si el evento básico siempre ocurre (típicamente, corresponde a que el componente siempre fallará).

**Importancia Estructural:** es el número de conjuntos de corte que contienen al evento básico.

### 6.1. Explosión de Metano.

La frecuencia de ocurrencia de este estado es de  $6.533E-8$ /año. Si se quisiera reducir aún más la frecuencia de ocurrencia, sería de gran ayuda conocer qué dispositivos afectan directamente a la ocurrencia del evento. Por fortuna SAPHIRE también cuenta con esta herramienta, nuevamente agruparemos cada estado final y veremos qué dispositivos afectan a la frecuencia de ocurrencia del estado final.

En la Tabla XVIII, se puede observar que el dispositivo más dominante es el BM01 con un 100% de aportación al estado final de explosión debido a una acumulación

de metano. El dispositivo BM01 es una bomba que está inyectando metano líquido al evaporador. La falla se postuló después de salir del evaporador, y se tendrá una explosión siempre que esta bomba no se detenga, ya que no hay otra manera de detener la fuga. Podemos proponer varias soluciones, desde modificar la tasa de falla de BM01, hasta realizar otra configuración del diagrama de la Figura 22.

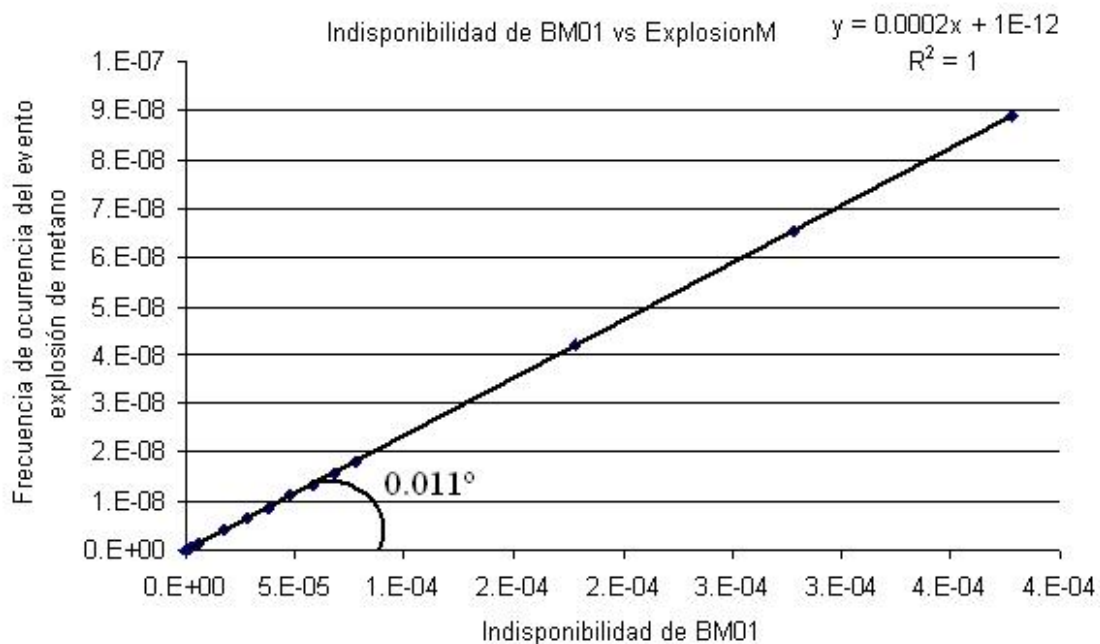
Primero realizamos modificaciones a la tasa de falla de BM01 y observamos cómo se comportó la frecuencia de ocurrencia de explosión de metano. En la Tabla XIX y en la Figura 30 se muestran los resultados. Se puede apreciar que la relación entre la indisponibilidad de BM01 con la frecuencia de ocurrencia de explosión de metano es lineal.

**Tabla XVIII. Aportación de diferentes dispositivos para dar origen al estado final explosión de metano.**

Event Name	# of Occur	Probability	F-V	Risk Reduc. Ratio	Risk Ince. Ratio
RU-ME	52	2.350E-004	1.000E+000	-----	4.255E+003
BM01	52	2.780E-004	1.000E+000	-----	3.597E+003
CHE02	51	2.780E-004	2.209E-008	1.000E+000	1.000E+000
VCACS02	8	2.200E-003	6.798E-009	1.000E+000	1.000E+000
VCACS01	8	2.200E-003	6.798E-009	1.000E+000	1.000E+000
CHE05	8	5.756E-002	6.798E-009	1.000E+000	1.000E+000
CHE04	8	5.756E-002	6.798E-009	1.000E+000	1.000E+000
VCVCS01	6	2.200E-003	5.098E-009	1.000E+000	1.000E+000
VCVCS04	6	2.200E-003	5.098E-009	1.000E+000	1.000E+000
VCVCS03	6	2.200E-003	5.098E-009	1.000E+000	1.000E+000
VCVCS02	6	2.200E-003	5.098E-009	1.000E+000	1.000E+000
OP	1	2.060E-003	1.699E-009	1.000E+000	1.000E+000
IBC	2	2.060E-003	1.699E-009	1.000E+000	1.000E+000
MV03	8	2.080E-004	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
BA08	6	1.860E-002	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
BA09	6	1.860E-002	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
BA10	6	1.860E-002	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
BA11	6	1.860E-002	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
MV04	8	2.080E-004	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
BA13	6	1.860E-002	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
BA12	6	1.860E-002	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
MPO	1	2.780E-004	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
BA05	8	1.860E-002	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
BA04	8	1.860E-002	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
FSE	1	2.700E-006	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
BA07	6	1.860E-002	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
BA06	6	1.860E-002	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000

**Tabla XIX. Relación indisponibilidad de la bomba con la frecuencia de ocurrencia de explosión de metano.**

Indisponibilidad de la Bomba. BM01	Frecuencia de ocurrencia de explosión de metano [evento/año]
FALSO	0.00E+00
5.00E-07	1.18E-10
6.00E-07	1.41E-10
7.00E-07	1.65E-10
9.00E-07	2.12E-10
3.00E-06	7.05E-10
6.00E-06	1.43E-09
1.80E-05	4.23E-09
2.80E-05	6.58E-09
3.78E-05	8.88E-09
4.80E-05	1.13E-08
5.80E-05	1.36E-08
6.80E-05	1.60E-08
7.80E-05	1.83E-08
1.78E-04	4.18E-08
2.78E-04	6.53E-08
3.78E-04	8.88E-08
VERDADERO	2.35E-04



**Figura 30. Relación indisponibilidad de la bomba con la frecuencia de ocurrencia de explosión de metano.**

De la Figura 30 podemos observar que esta gráfica es totalmente lineal y además que la pendiente es muy suave, tiene un ángulo de inclinación de 0.011°. Esto significa que se debe variar demasiado la indisponibilidad de BM01 para notar apenas un cambio en la frecuencia de ocurrencia de explosión de metano. Por lo

tanto, el uso de un valor de indisponibilidad menor resulta en un decremento en la frecuencia total de explosión de metano.

Ahora supongamos que una vez hecho el análisis, se propone colocar una válvula antes de pasar al evaporador (EM01). Esta válvula al cerrarse, aunque no se detenga la bomba, provoca el desvío del metano nuevamente al tanque de almacenamiento de metano.

El diagrama de la nueva configuración se muestra en la Figura 31.

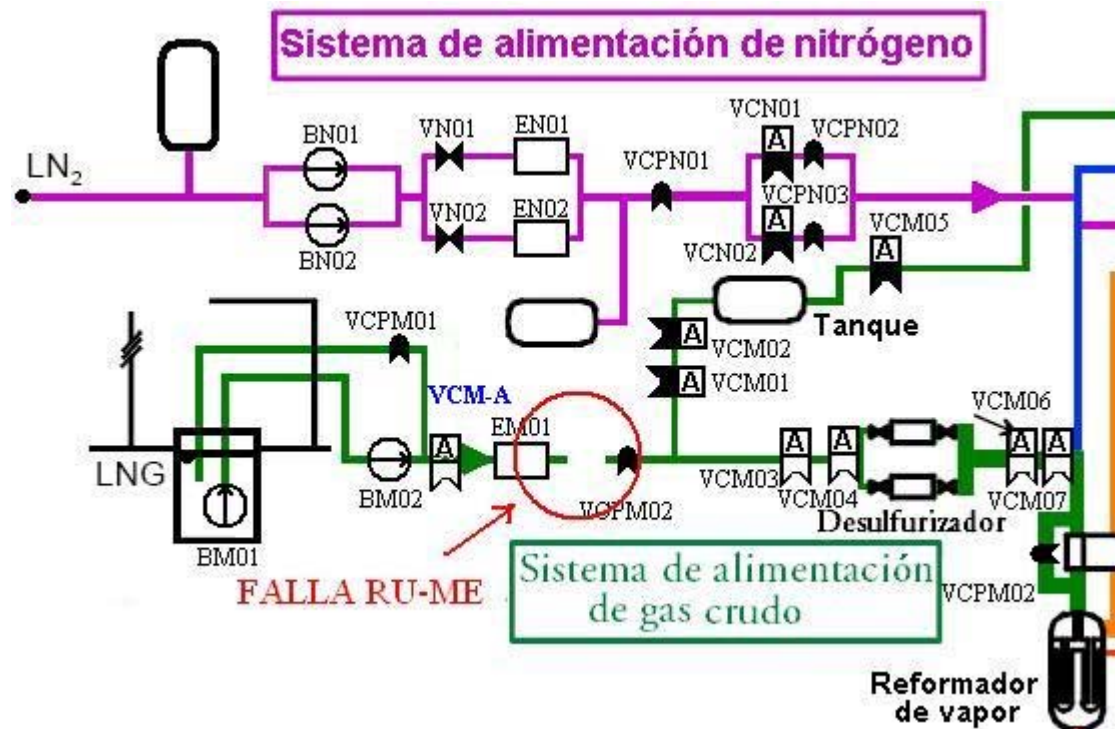


Figura 31. Configuración sugerida después del análisis.

Se agregó al diagrama la válvula VCM-A (justo después de la bomba BM02), con esta nueva configuración se modifica el sistema META, que es el encargado de detener la fuga de metano. Al evaluar el nuevo árbol se obtienen los resultados mostrados en la Tabla XX.

Tabla XX. Probabilidad de falla de cada sistema en el evento RU-ME, al incluir una modificación en la configuración del sistema.

Fault Tree	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc	Size Trunc
VCS	1.015E-02	1.004E-02	5.617E-03	8.981E-03	1.775E-02	1.000E-15	--
ACS	8.452E-03	7.281E-03	2.023E-03	4.980E-03	1.917E-02	1.000E-15	--
DESV	2.780E-04	2.872E-04	1.502E-05	1.200E-04	1.006E-03	1.000E-15	--
APAG	4.816E-06	4.837E-06	3.922E-07	2.180E-06	1.459E-05	1.000E-15	--
META	6.116E-07	6.497E-07	1.214E-08	1.816E-07	2.792E-06	1.000E-15	--

El agregar esta válvula la probabilidad de falla del sistema META se redujo por debajo del mismo sistema de apagado del reactor.

En la Tabla XIX se señala el cambio necesario en la indisponibilidad de falla de la bomba para acercarse al resultado en la frecuencia de ocurrencia del estado de explosión de metano al colocar la válvula de corte propuesta. Se debe disminuir la indisponibilidad de la bomba de  $2.78E-4$  a  $6E-7$  para generar los mismos resultados que se calcularon debido a la colocación de una la válvula de corte, el problema es que el margen de variabilidad de apagado de la bomba BM01 es de  $1.551E-5$  a  $9.89E-4$ , por lo  $6E-7$  esta fuera del rango de variabilidad de fallas observadas.

La Tabla XXI muestra la frecuencia de explosión de metano después de realizar la nueva configuración.

**Tabla XXI. Frecuencia de explosión de metano después de realizar la modificación.**

The screenshot shows the 'EndState Review - (RU-ME)' window. At the top, 'Sort Order' is set to 'Current min cut frequency' and 'Analysis Type' is 'RANDOM'. Below is a table with the following data:

End State	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc
EXPLOSIONM	1.437E-10	1.326E-10	3.390E-12	4.195E-11	5.291E-10	1.000E-20
EXPLOSIONM-DTP	3.444E-18	2.665E-18	0.000E+00	1.826E-19	1.020E-17	1.000E-20
EXPLOSIONM-DTQ	1.826E-19	2.610E-19	0.000E+00	0.000E+00	4.174E-19	1.000E-20
TOTALS =	1.437E-10	1.326E-10				

At the bottom, there are 'Views' options: Description, Base Case, Base Case Unc., Current Vs. Base, Current Case (selected), and Current Case Unc. There are also 'Report' and 'Exit' buttons.

El resultado de colocar la válvula de corte, con el mismo valor de indisponibilidad original de la bomba de  $2.78E-4$ , redujo la frecuencia de ocurrencia de explosión de metano de  $6.533E-8$  /año a  $1.437E-10$  /año.

Comparando la modificación de variar la indisponibilidad de BM01 con la modificación en la configuración del diagrama de la Figura 31, al colocar la nueva válvula de corte que ayudará a desviar el flujo de metano de regreso al tanque de almacenamiento, se sugiere, si es que se quiere reducir la frecuencia de ocurrencia de la explosión de metano y el costo lo amerite, colocar la válvula VCM-A. Esto se debe a que se reduce más la frecuencia de ocurrencia de explosión de metano, aparte que no se depende sólo de un dispositivo, como en el caso de sólo variar la indisponibilidad de BM01.

## 6.2. Explosión de Hidrógeno.

La frecuencia de ocurrencia de este estado es de  $1.127E-11$  fallas/año, nuevamente podemos ayudarnos de la herramienta de SAPHIRE para ver la influencia de los dispositivos sobre el estado final EXPLOSIONH2. La Tabla XXII muestra la aportación de diferentes dispositivos al estado final, como ya habíamos dicho, este estado final podría provocar otro estado final que es el de liberación de productos de fisión, pero por ahora sólo analizaremos el de explosión por acumulación de

hidrógeno. La frecuencia de ocurrencia de este estado final ya es bajo, pero veamos qué dispositivos influyen y en qué porcentaje en este estado final.

De acuerdo a la Tabla XXII, se observa que son cuatro, principalmente, los dispositivos que dominan la frecuencia del estado final; estos dispositivos son: IBC, OP, VCPPWC01 y VCPPWC02.

IBC se refiere a la falla de inserción de barras de control, OP a la falla del operador en lo que se refiere a detectar una anomalía en la operación del reactor y en accionar el SCRAM, en caso de que éste no haya sido accionado automáticamente. El modo de falla de las válvulas VCPPWC01 y VCPPWC02 es falla a cerrar para detener el flujo de agua dentro de la vasija presurizada del reactor.

**Tabla XXII. Aportación de diferentes dispositivos para dar origen al estado final de explosión de hidrógeno.**

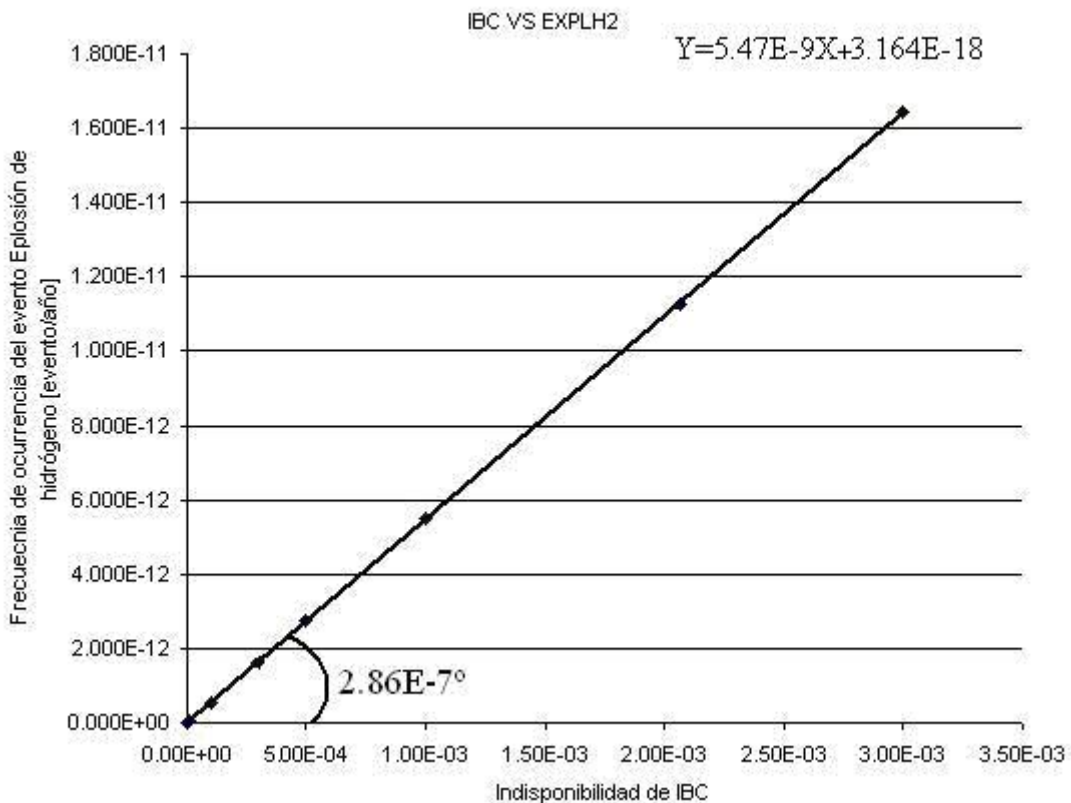
Event Name	# of Occur	Probability	F-V	Risk Reduc. Ratio	Risk Incre. Ratio
IBC	18	2.060E-003	1.000E+000	-----	4.854E+002
RI-PPWC	24	5.000E-004	1.000E+000	-----	2.000E+003
OP	12	2.060E-003	8.811E-001	8.410E+000	4.278E+002
VCPPWC02	8	2.200E-003	4.703E-001	1.888E+000	2.143E+002
VCPPWC01	8	2.200E-003	4.703E-001	1.888E+000	2.143E+002
MPO	9	2.780E-004	1.189E-001	1.135E+000	4.286E+002
BA03	8	2.780E-004	5.942E-002	1.063E+000	2.147E+002
RECIRCULADOR	6	2.780E-004	2.857E-004	1.000E+000	1.999E+000
INT	3	2.780E-004	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
INTTMP	6	2.400E-005	0.000E+000	1.000E+000	1.012E+000
INTPR	6	2.400E-005	0.000E+000	1.000E+000	1.012E+000
VCSPA02	6	2.200E-003	0.000E+000	1.000E+000	1.002E+000
VCSPA01	6	2.200E-003	0.000E+000	1.000E+000	1.002E+000

Modificaremos una sola variable para ver como afecta la frecuencia del estado final, probemos primero para IBC. La Tabla XXIII muestra la frecuencia del estado final de explosión de hidrógeno al modificar la probabilidad de falla de la inserción de barras de control.

**Tabla XXIII. Relación indisponibilidad de inserción de barras de control con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.**

Indisponibilidad IBC	EXPH2 [evento/año]
FALSO	3.164E-18
1.00E-05	5.471E-14
1.00E-04	5.471E-13
3.00E-04	1.642E-12
5.00E-04	2.735E-12
1.00E-03	5.471E-12
2.06E-03	1.127E-11
3.00E-03	1.642E-11
VERDADERO	5.471E-09

Con los datos de la Tabla XXIII se realizó la gráfica mostrada en la Figura 32.



**Figura 32. Relación indisponibilidad de inserción de barras de control con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.**

Se puede apreciar que es una relación lineal con una pendiente de  $5.47E-9$  que equivale a una inclinación de  $2.86E-7^\circ$ , con una ordenada al origen que es prácticamente cero, esto indica que si la inserción de barras fuera 100% segura, la explosión de hidrógeno tendría una frecuencia de ocurrencia muy pequeña del orden de  $10^{-8}$ .

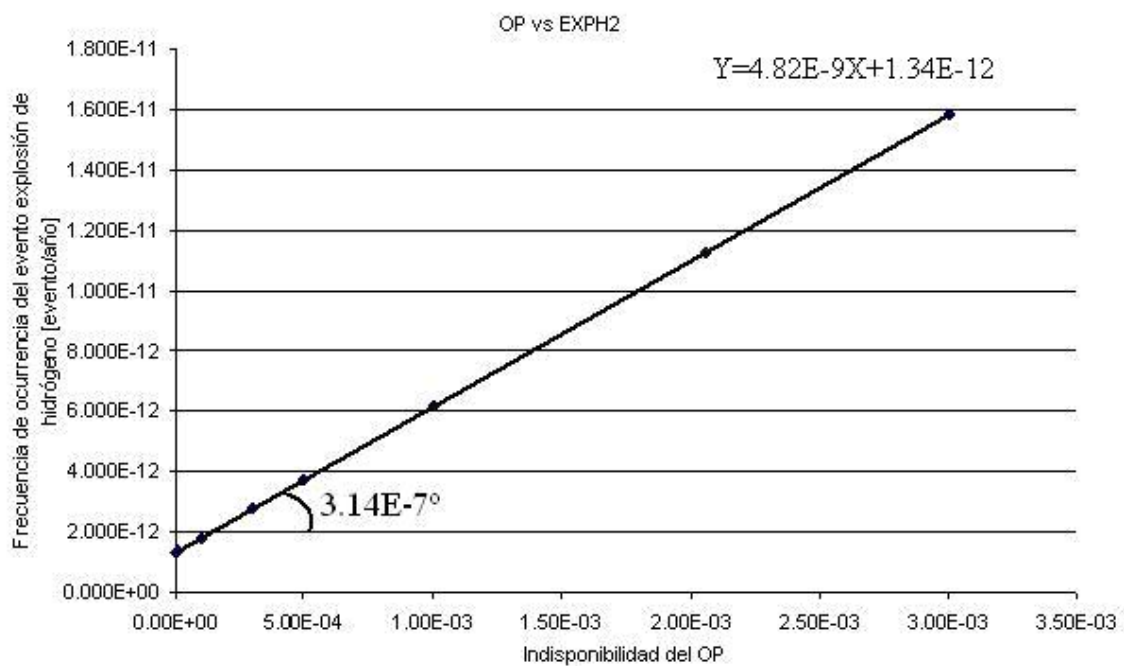


Ahora modifiquemos la indisponibilidad del OP, los resultados se muestran en la Tabla XXIV.

**Tabla XXIV. Relación indisponibilidad del operador con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.**

Indisponibilidad OP	EXPH2 [eventos/año]
FALSO	1.340E-12
1.00E-05	1.388E-12
1.00E-04	1.822E-12
3.00E-04	2.786E-12
5.00E-04	3.750E-12
1.00E-03	6.160E-12
2.06E-03	1.127E-11
3.00E-03	1.580E-11
VERDADERO	4.819E-09

Los datos de la Tabla XXIV se graficaron y se muestran en la Figura 33.



**Figura 33. Relación indisponibilidad del operador con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.**

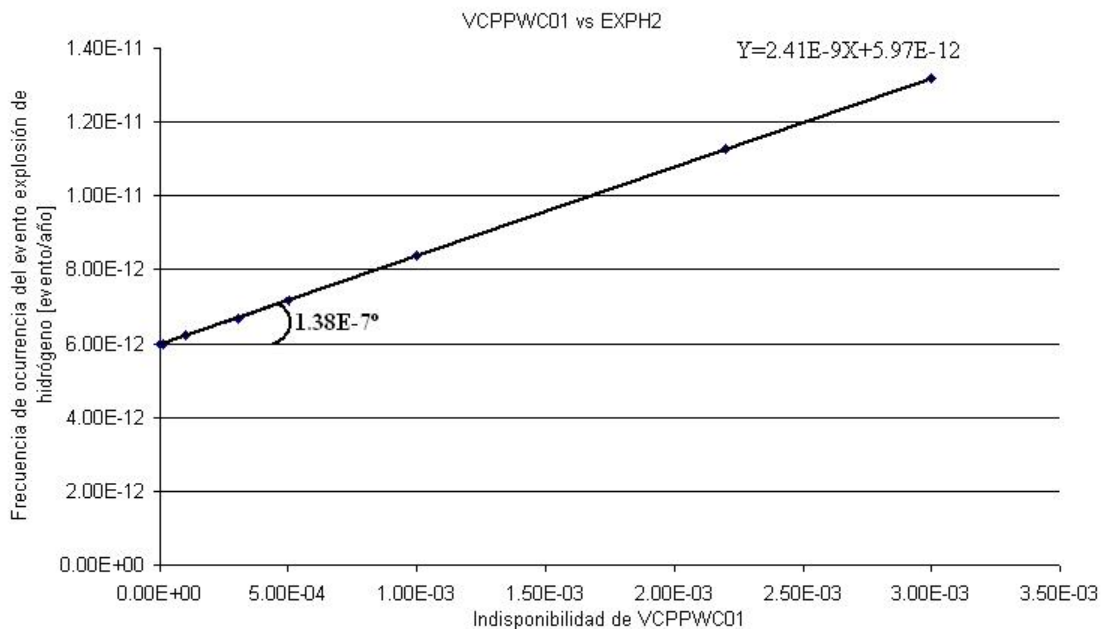
En la Figura 33, se tiene una relación lineal con una pendiente de  $5E-9$  que equivale a un ángulo de inclinación de  $3.14E-7^\circ$  y una ordenada al origen de  $1.34E-12$ .

En la Tabla XXV, se modificó primero una sola válvula de corte manteniendo la otra con la indisponibilidad de  $2.2E-3$ , los resultados se muestran en la Tabla XXV.

**Tabla XXV. Relación indisponibilidad de una válvula de corte del PPWC con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.**

Indisponibilidad VCPPWC01	EXPH2 [eventos/año]
FALSO	5.969E-12
1.00E-05	5.993E-12
1.00E-04	6.209E-12
3.00E-04	6.691E-12
5.00E-04	7.172E-12
1.00E-03	8.377E-12
2.20E-03	1.127E-11
3.00E-03	1.319E-11
VERDADERO	2.409E-09

Los datos obtenidos en la Tabla XXV se graficaron y se presentan en la Figura 34.



**Figura 34. Relación indisponibilidad de una válvula de corte del PPWC con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.**

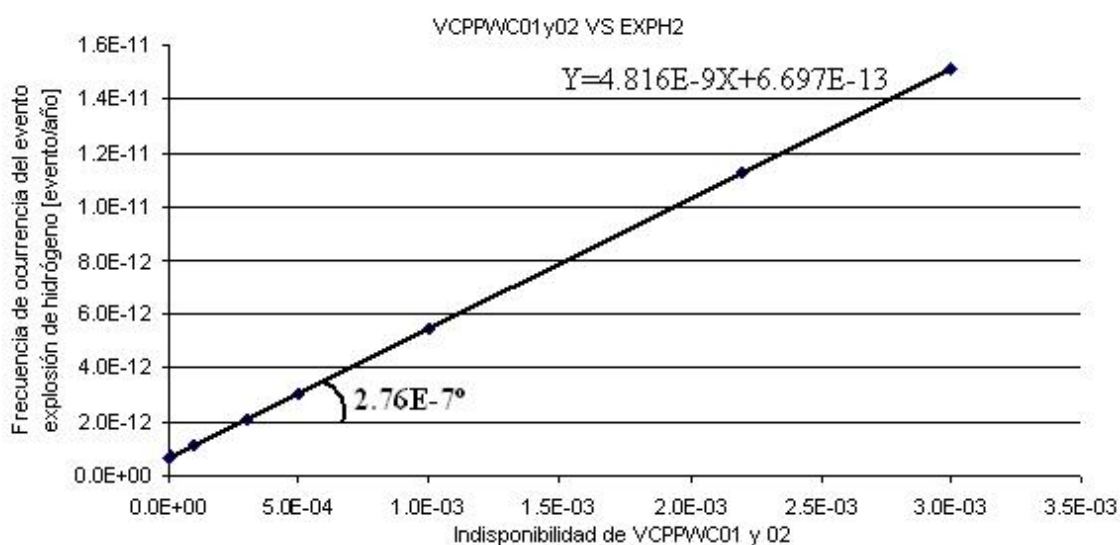
De la Figura 34 observamos que se tiene una pendiente de 2.41E-9, que equivale a 1.38E-7° y una ordenada al origen de 5.97E-12.

Ahora supongamos que las modificaciones se realizan a ambas válvulas o si es que se reemplazan ambas válvulas, variaremos la indisponibilidad de ambas válvulas para encontrar su relación con el estado final. En la Tabla XXVI se muestran los resultados.

**Tabla XXVI. Relación indisponibilidad de las válvulas de corte del PPWC con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.**

Indisponibilidad VCPPWC01y02	EXPH2 [evento/año]
FALSO	6.697E-13
1.00E-05	7.178E-13
1.00E-04	1.151E-12
3.00E-04	2.115E-12
5.00E-04	3.079E-12
1.00E-03	5.488E-12
2.20E-03	1.127E-11
3.00E-03	1.512E-11
VERDADERO	2.409E-09

Nuevamente graficamos los resultados de la tabla XXVI dando origen a la Figura 35.



**Figura 35. Relación indisponibilidad de la válvula de corte del PPWC con la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno.**

La relación de las válvulas de corte con la frecuencia de ocurrencia de explosión de metano es lineal y tiene una pendiente de  $4.816E-9$ , que corresponde a una inclinación de  $2.76E-7^\circ$  con una ordenada al origen de  $6.697E-13$ .

Después de observar las variaciones a los dispositivos con una mayor influencia en el estado final explosión de hidrógeno, se concluye que si se quiere reducir significativamente la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno, se debe reducir la indisponibilidad de inserción de barras de control, después la indisponibilidad de falla de las dos válvulas de corte del PPWC y por último reducir la indisponibilidad del operador.

De las Tablas XXIII, XXIV y XXVI se pueden observar las variaciones que se les hicieron a los dispositivos en cuanto a su indisponibilidad y la influencia de éstas sobre la frecuencia de explosión de hidrógeno. Para todos se propuso una indisponibilidad de cero, que se traduce como éxito seguro cuando el dispositivo se requiera. Con esto se tuvo que el mejor resultado fue la inserción de barras de control, ya que cuando éstas operan exitosamente, la frecuencia de ocurrencia de

explosión de hidrógeno se reduce notablemente, más que la contribución de los otros dispositivos.

### 6.3. Liberación de Productos de Fisión.

La liberación de productos de fisión puede ser ocasionada tanto por el evento RU-HE como por RU-PPWC, la frecuencia de liberación de productos de fisión es de  $6.58E-9$  /año.

El dispositivo dominante en la ocurrencia del estado final es el recirculador, tal y como lo muestra la Tabla XXVII.

**Tabla XXVII. Aportación de diferentes dispositivos para dar origen al estado final de liberación de productos de fisión.**

Event Name	# of Occur	Probability	F-V	Risk Reduc. Ratio	Risk Ince. Ratio
RU-HE	24	2.120E-005	9.999E-001	8.896E+003	4.716E+004
RECIRCULADOR	16	2.780E-004	9.829E-001	5.844E+001	3.536E+003
VCSPA01	14	2.200E-003	1.711E-002	1.017E+000	8.761E+000
VCSPA02	14	2.200E-003	1.711E-002	1.017E+000	8.761E+000
VCVCS04	2	2.200E-003	2.178E-003	1.002E+000	1.988E+000
VCVCS03	2	2.200E-003	2.178E-003	1.002E+000	1.988E+000
VCVCS02	2	2.200E-003	2.178E-003	1.002E+000	1.988E+000
VCVCS01	2	2.200E-003	2.178E-003	1.002E+000	1.988E+000
BA07	2	1.860E-002	3.424E-004	1.000E+000	1.018E+000
BA06	2	1.860E-002	3.424E-004	1.000E+000	1.018E+000
BA13	2	1.860E-002	3.424E-004	1.000E+000	1.018E+000
BA08	2	1.860E-002	3.424E-004	1.000E+000	1.018E+000
BA12	2	1.860E-002	3.424E-004	1.000E+000	1.018E+000
BA11	2	1.860E-002	3.424E-004	1.000E+000	1.018E+000
BA10	2	1.860E-002	3.424E-004	1.000E+000	1.018E+000
BA09	2	1.860E-002	3.424E-004	1.000E+000	1.018E+000
IBC	8	2.060E-003	1.172E-004	1.000E+000	1.057E+000
RU-PPWC	6	5.000E-004	1.124E-004	1.000E+000	1.225E+000
OP	5	2.060E-003	1.033E-004	1.000E+000	1.050E+000
MPO	4	2.780E-004	1.393E-005	1.000E+000	1.050E+000
FSE	2	2.700E-006	2.657E-006	1.000E+000	1.990E+000
INT	1	2.780E-004	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
INTTMP	2	2.400E-005	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000
INTPR	2	2.400E-005	0.000E+000	1.000E+000	1.000E+000

El dispositivo dominante para que se dé este estado final es el recirculador ubicado en el sistema de purificación de aire. Se trata de un sistema que conecta la CV con el área de servicio. Cuando ocurre la falla, la CV debe aislarse para evitar que los productos de fisión sean liberados a través del área de servicio hacia la atmósfera. La manera de aislar la CV es cerrar alguna de las dos válvulas y parar el recirculador de la Figura 29.

Podemos proponer que la falla de apagado del recirculador disminuya, al colocar un operador encargado del apagado manual del recirculador, en caso de que éste falle, entonces se tienen dos maneras de parar el recirculador: apagándolo de manera normal y otra por medio de un operador que se encargue de cortar el suministro de energía al recirculador.

Al colocar en el árbol de fallas la falla del operador, se tiene una frecuencia de ocurrencia de liberación de productos de fisión de  $1.166E-10$  /año, tal y como lo muestra la Tabla XXVIII.

**Tabla XXVIII. Frecuencia de ocurrencia del estado final liberación de productos de fisión después de la modificación.**

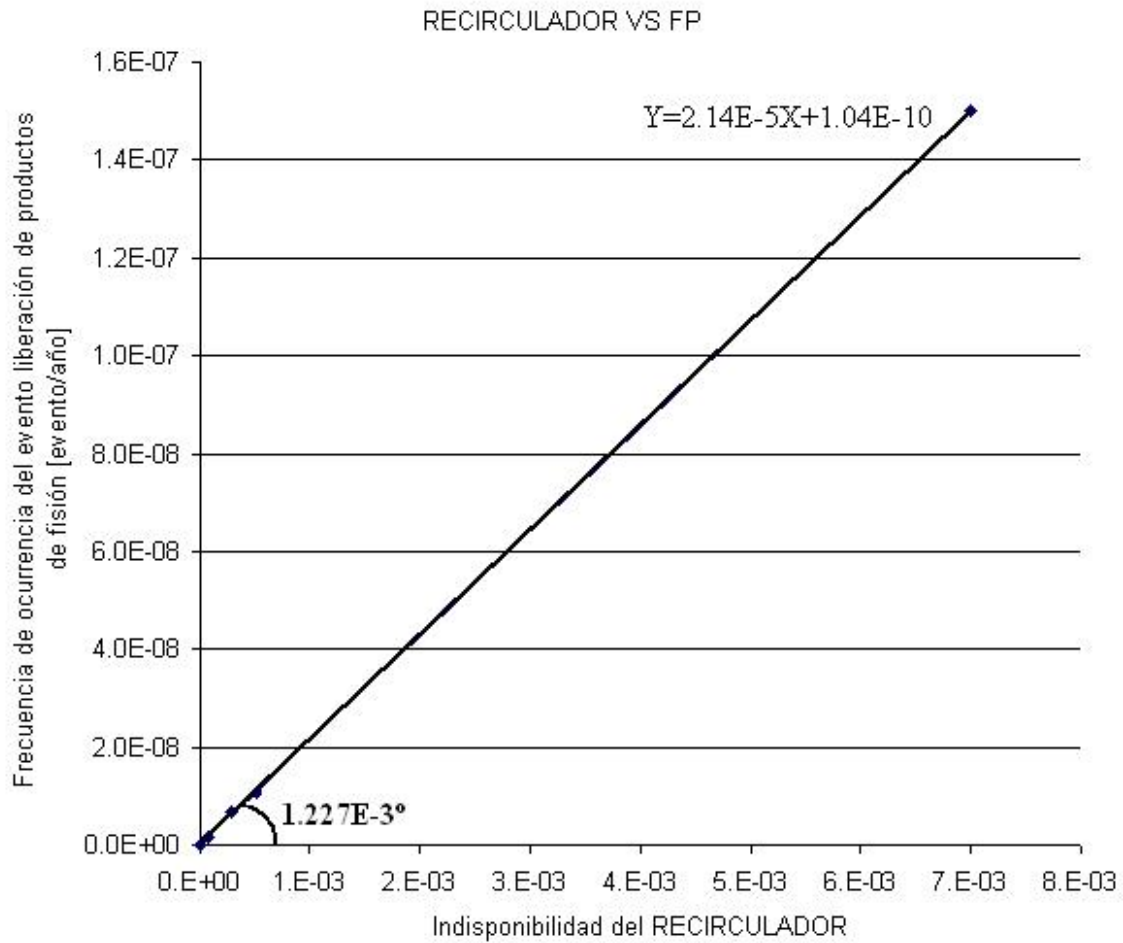
End State	Frequency	Mean	5th	Median	95th	Prob Trunc
FP	1.148E-10	1.224E-10	7.672E-12	5.304E-11	3.884E-10	1.000E-20
FP-DTP	1.169E-12	1.225E-12	6.723E-14	4.797E-13	4.364E-12	1.000E-20
FP-DT	6.270E-13	6.487E-13	6.488E-15	1.034E-13	2.558E-12	1.000E-20
EXPLOSIONH2-FP	2.814E-15	2.944E-15	2.109E-17	4.023E-16	8.826E-15	1.000E-20
TOTALS =	1.166E-10	1.243E-10				

Otra propuesta sería la de modificar la probabilidad de falla del recirculador y observar el comportamiento de la frecuencia de ocurrencia de la liberación de productos de fisión, los resultados se muestran en la Tabla XXIX.

**Tabla XXIX. Relación indisponibilidad del RECIRCULADOR con la frecuencia de ocurrencia de liberación de productos de fisión.**

RECIRCULADOR	FP
FALSO	1.04E-10
7.00E-05	1.60E-09
2.78E-04	6.58E-09
5.00E-04	1.08E-08
7.00E-03	1.50E-07
VERDADERO	2.14E-05

Con los datos obtenidos de la Tabla XXIX se obtuvo la gráfica de la Figura 36.



**Figura 36. Relación indisponibilidad del recirculador con la frecuencia de ocurrencia de liberación de productos de fisión.**

Para tener la misma frecuencia de ocurrencia de liberación de productos de fisión al agregar el operador, se necesitaría variar la indisponibilidad del recirculador de  $2.78E-4$  a  $6E-7$ , pero el intervalo de variabilidad del recirculador es de  $1.551E-5$  a  $2.866E-4$ .

## CONCLUSIONES.

El principal reto en el desarrollo de esta tesis fue el de realizar un análisis preliminar de seguridad a una planta que está en proceso de desarrollo, que aún no se encuentra terminada y que por lo tanto no tiene experiencia operativa. Este análisis representa un primer intento por estudiar las consecuencias, desde el punto de vista de la seguridad, entre una planta de producción de hidrógeno y un reactor nuclear.

Para iniciar el análisis de seguridad se tuvo que investigar por separado acerca del diseño, la operación, sus sistemas y dispositivos, tanto de la planta de reformación de metano como del HTTR.

La mayoría de los dispositivos no están descritos perfectamente en la documentación, como es el caso de válvulas y bombas; por eso se tomaron tasas de fallas genéricas, acercándonos lo más posible a la descripción del dispositivo o a la función que realiza.

Dentro de la documentación disponible, por un lado se tenía un diagrama de la planta química que no incluía todos los dispositivos y por otro lado la descripción y diseño del HTTR. Con esta información se logró acoplar ambas plantas realizando un sólo diagrama.

Uno de los resultados del HAZOP mostró que es más conveniente que la planta de reformación de metano se encuentre al aire libre, que encerrada en un edificio, para evitar una posible acumulación de hidrógeno y en consecuencia una explosión. Como el hidrógeno es mucho menos denso que el aire se disipa de manera rápida y fácilmente, es por eso que en este análisis no se tomó en cuenta una posible acumulación de hidrógeno del lado de la planta de reformación de metano.

Por otra parte, los resultados del HAZOP pueden servir para identificar los eventos iniciadores capaces de provocar alguna pérdida económica; restaría construir los árboles de fallas y de eventos y cuantificarlos; para este tipo de análisis de riesgo económico.

En general el sistema con una mayor probabilidad de falla es el sistema VCS con un 90% de certeza, con un valor entre  $4.579E-3$  y  $1.847E-2$ . El sistema con menor probabilidad de falla es el sistema de apagado del reactor, con un 90% de certeza que se encuentra con una probabilidad de falla entre  $4.158E-7$  y  $1.951E-5$ ; este resultado muestra la seguridad con la que cuenta el HTTR.

En los resultados generales el estado final con una mayor frecuencia de ocurrencia es el estado final de oxidación de grafito con un 90% de certeza de que se encuentre entre el rango de  $6.559E-7$ /año y  $5.206E-6$ /año; aunque fue en general el evento con una mayor frecuencia de ocurrencia, en realidad se trata de una frecuencia de ocurrencia pequeña, si lo comparamos por ejemplo con la frecuencia de fundición del núcleo de un reactor nuclear típico de agua ligera, cuyo valor es alrededor de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$  eventos/año.

El estado final de oxidación de grafito afecta directamente a la parte económica y no fue tomado en cuenta en este análisis; la frecuencia de ocurrencia para tener un evento que afecte a la población tiene un intervalo de confianza del 90% de entre  $4E-9$ /año a  $2.4E-7$ /año; donde el estado final más probable que tenga daños a la salud es el de explosión de metano con un intervalo de confianza del 90% de  $3.806E-9$ /año a  $2.475E-7$ /año. El siguiente estado final es el de liberación de productos de fisión con un intervalo de confianza del 90% de  $4.056E-10$ /año a  $2.095E-8$  y por último el estado final con la menor frecuencia de ocurrencia es el de explosión de hidrógeno dentro de la vasija del reactor con un intervalo de confianza del 90% de  $5.541E-13$ /año a  $4.268E-11$ /año.

Aunque se usaron tasas de fallas de componentes genéricos, las frecuencias de ocurrencia de los estados finales con daño a la salud fueron pequeñas y se podrían afinar los resultados, es decir ser más precisos si se lograra contar con las tasas de falla específicas de la planta y la incertidumbre se puede reducir teniendo un factor de error menor, es decir reduciendo los intervalos de incertidumbre de cada componente.

Con el análisis de sensibilidad se buscó conocer la influencia de la variabilidad de los componentes dominantes en los estados finales, con ayuda de las graficas y las tablas, resultado de variar la indisponibilidad de los dispositivos, se logró ver que se tiene en todos los casos una relación lineal y con pendientes muy pequeñas y por lo tanto casi co-lineales al eje horizontal.

Se trató de reducir la frecuencia de ocurrencia de los estados finales con daño a la salud modificando la indisponibilidad de los dispositivos dominantes y modificando la configuración del diagrama original, se tuvieron los siguientes resultados:

Para el estado final, explosión de metano, se logró reducir la probabilidad de falla del sistema META de  $2.78E-4$  a  $6.116E-7$ , haciéndolo un sistema más seguro al colocar una válvula de corte que desviaría el flujo de helio al tanque de almacenamiento en caso del evento iniciador RU-ME. Con esta modificación, el sistema META se vuelve más seguro aunque el sistema de apagado del reactor. Con la mejora del sistema META, la frecuencia de ocurrencia del estado final, explosión de metano, disminuyó de  $7.038E-8/año$  a  $1.326E-10/año$  en valor promedio; se buscó identificar el valor de la indisponibilidad necesaria en la bomba BM01 para obtener la misma frecuencia de ocurrencia de explosión de metano y se obtuvo que se debería tener una indisponibilidad de  $6E-7$ . Este valor queda fuera del rango de varianza del valor de la bomba, por lo que no es posible alcanzar este valor de indisponibilidad con la bomba que se encuentra instalada. Se concluyó que la mejor opción para reducir la frecuencia de ocurrencia consiste en colocar una válvula de corte idéntica a las utilizadas a lo largo de la línea de metano.

Para el estado final, explosión de hidrógeno, se realizó el mismo procedimiento, obteniéndose una dependencia lineal de la indisponibilidad de los componentes dominantes, con la frecuencia de ocurrencia del estado final explosión de hidrógeno. El mejor resultado en cuanto a lograr disminuir la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno dentro de la vasija del reactor, variando la indisponibilidad de los componentes, lo tuvo la inserción de barras de control, ya que la ordenada al origen es muy pequeña, del orden de  $10^{-18}$ , esto indica que si se logrará hacer este sistema más confiable, se reduciría considerablemente la frecuencia de ocurrencia de explosión de hidrógeno. Se puede aumentar la confiabilidad del sistema de inserción de barras de control tomando en cuenta los problemas que se han tenido en este sistema y que han sido reportados; como en el caso de *Fort Saint Vrain*, que tuvo problemas con la inserción de barras de control debido a la intrusión de humedad al sistema de barras de control. Reportes de operación de reactores de alta temperatura enfriados por gas como el HTTR, podrían ayudar a optimizar el sistema de inserción de barras de control. Los valores de indisponibilidad de inserción de barras de control fueron tomados de un reporte del reactor nuclear de *Fort Saint Vrain*. En este reporte de experiencias operacionales se aprecian dificultades en la inserción de barras de control debidas principalmente a la humedad dentro de los mecanismos de las barras de control. Se sugiere que en el HTTR se tenga cuidado con este problema y así reducir la indisponibilidad de inserción de barras de control y a su vez esto disminuirá la frecuencia de ocurrencia del estado final explosión de hidrógeno.



Para el estado final liberación de productos de fisión, se encontró que el componente dominante es el recirculador que conecta la contención de la vasija con el área de servicio, la falla de interés es a parar el recirculador, en este caso se introduce a un operador encargado de parar manualmente el recirculador en caso de que este falle a parar, con la contribución del operador, la frecuencia de ocurrencia disminuyó de  $5.947E-9$  a  $1.243E-10$  en valor promedio. El valor de indisponibilidad que debería tener el recirculador para tener los mismos resultados en la frecuencia de ocurrencia del estado final de liberación de productos de fisión, al agregar al operador sería de  $6E-7$ . Este valor queda fuera del rango de variabilidad del componente recirculador, por lo que no podría ser alcanzado con este recirculador.

Otro evento iniciador interesante de analizar sería el de pérdida de energía externa. En este tipo de evento se tiene automáticamente un SCRAM y la fuente de energía de respaldo consta de dos generadores de gas que alimentan al ACS y al VCS y un banco de baterías que alimenta al equipo de control. Un generador de gas es suficiente para apagar al reactor y remover el calor de decaimiento por medio del ACS y el VCS. Estos generadores de gas ahorran espacio y aparte no se necesita incluir un sistema de enfriamiento al generador.

Queda como un trabajo futuro realizar el análisis de este evento iniciador, para lo cual habrá que desarrollar y cuantificar su árbol de eventos y de fallas, así como realizar su estudio de sensibilidad, una vez obtenidos los componentes dominantes.

Por último, con este análisis se realizó un acercamiento para cuantificar la seguridad de la planta de reformación de metano acoplada al HTTR. Los valores pueden ser afinados al contarse con una mayor descripción de los dispositivos y de los procedimientos de operación y mantenimiento, que en este trabajo no se tuvieron, aun así con datos genéricos la planta en general muestra su seguridad y confiabilidad.

## ANEXO A

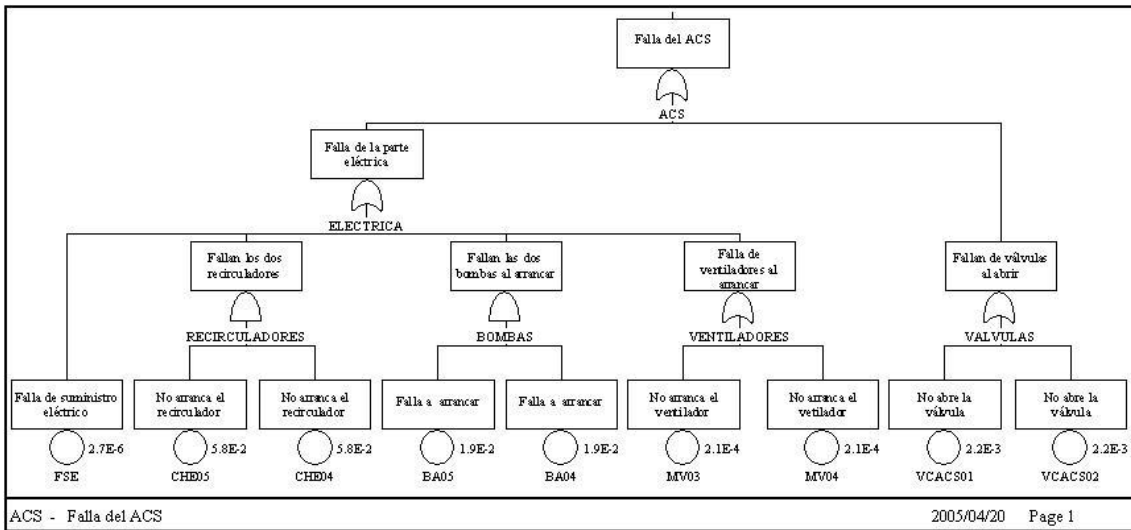
**Tasas de Fallas. El factor de error fue calculado considerando que las tasas de falla siguen una distribución lognormal**

Dispositivo	Descripción	Tipo de falla	Promedio $\times 10^{-3}$	F.E.	Ref.
BA03	Bomba centrífuga de agua	A parar	0.278	10.00	15
BA04	Bomba centrífuga de agua	A arrancar	18.6	1.80	5
BA05	Bomba centrífuga de agua	A arrancar	18.6	1.80	5
BA06	Bomba centrífuga de agua	A arrancar	18.6	1.80	5
BA07	Bomba centrífuga de agua	A arrancar	18.6	1.80	5
BA08	Bomba centrífuga de agua	A arrancar	18.6	1.80	5
BA09	Bomba centrífuga de agua	A arrancar	18.6	1.80	5
BA10	Bomba centrífuga de agua	A arrancar	18.6	1.80	5
BA11	Bomba centrífuga de agua	A arrancar	18.6	1.80	5
BA12	Bomba centrífuga de agua	A arrancar	18.6	1.80	5
BA13	Bomba centrífuga de agua	A arrancar	18.6	1.80	5
BM01	Bomba de metano	A parar	0.278	10.00	15
CHE02	Recirculador	A parar	0.278	10.00	15
CHE04	Recirculador	A arrancar	57.56	18.60	5
CHE05	Recirculador	A arrancar	57.56	18.60	5
FSE	Sistema eléctrico	Total	0.0027		15
IBC	Barras de control	A insertar	2.06		6
INT	Interruptor	Pérdida de función	0.278	10.00	15
INTPR	Interruptor de presión	Pérdida de función	0.024	10.00	15
INTTMP	Interruptor de temperatura.	Pérdida de función	0.024	10.00	15
MPO	Sistema de apagado de reserva	A liberar pellets	0.278	10.00	15
MV03	Ventilador acoplado a un motor	A arrancar	0.208	9.00	5
MV04	Ventilador acoplado a un motor	A arrancar	0.208	9.00	5
OP	Operador	Función	2.06	9.66	6, 15
RECIRCULADOR	Recirculador	A parar	0.278	8.10	5
VCACS01	Válvula de corte	A abrir	2.2	4.65	5
VCACS02	Válvula de corte	A abrir	2.2	4.65	5
VCPPWC01	Válvula de corte	A cerrar	2.2	4.65	5
VCPPWC02	Válvula de corte	A cerrar	2.2	4.65	5
VCSPA01	Válvula de corte	A cerrar	2.2	4.65	5
VCSPA02	Válvula de corte	A cerrar	2.2	4.65	5
VCVCS01	Válvula de corte	A abrir	2.2	4.65	5
VCVCS02	Válvula de corte	A abrir	2.2	4.65	5
VCVCS03	Válvula de corte	A abrir	2.2	4.65	5
VCVCS04	Válvula de corte	A abrir	2.2	4.65	5

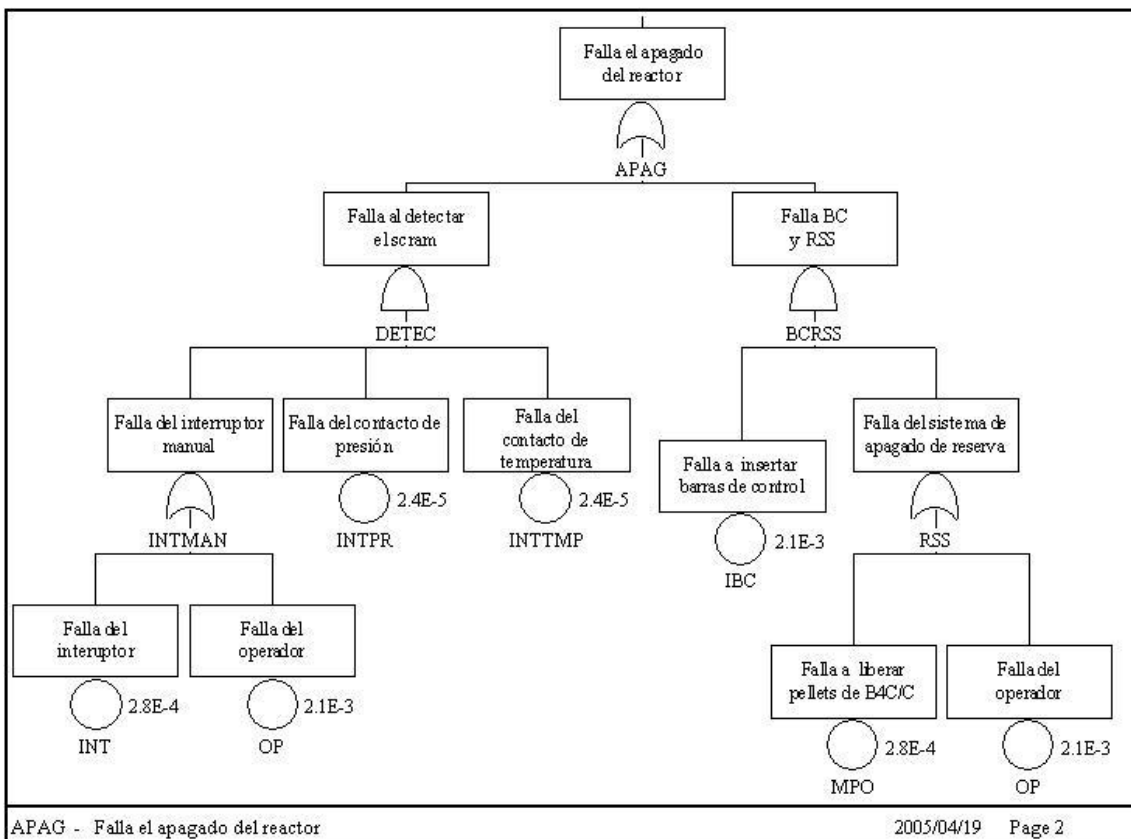
Evento Inicial.	Descripción.	Tasa de falla [fallas/año]	REF.
RU-ME	Ruptura de la línea de metano.	2.35E-04	5
RU-HE	Ruptura de la línea de Helio	2.12E-05	15
RU-PPWC	Ruptura de un tubo de transferencia de calor en PPWC	5.00E-04	15

## ANEXO B Árboles de Fallas

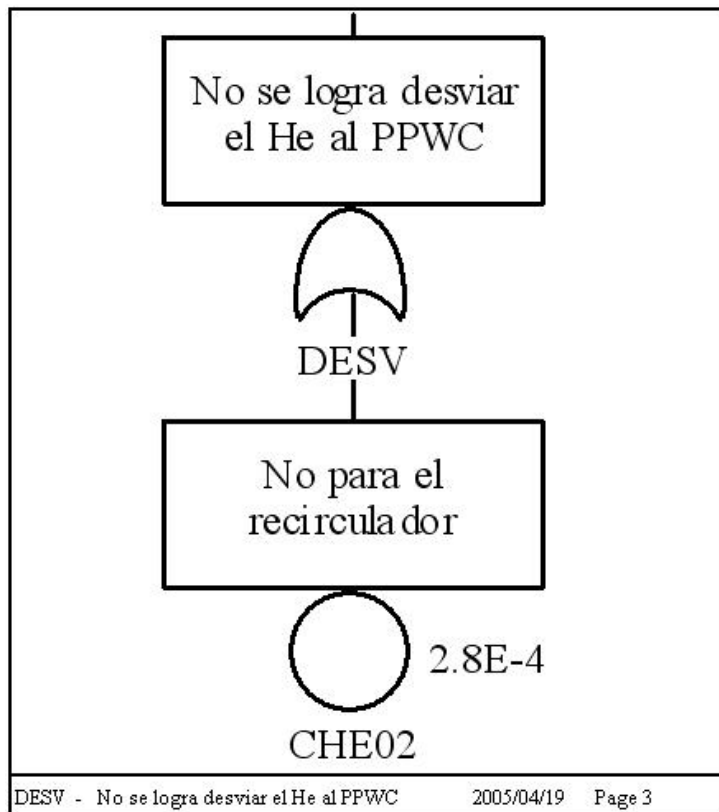
### Evento Iniciador RU-ME



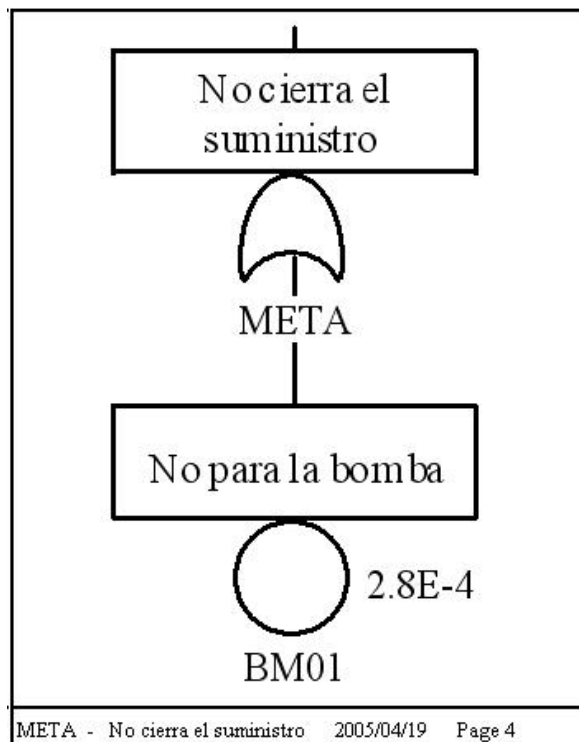
**Sistema ACS (ACS).**



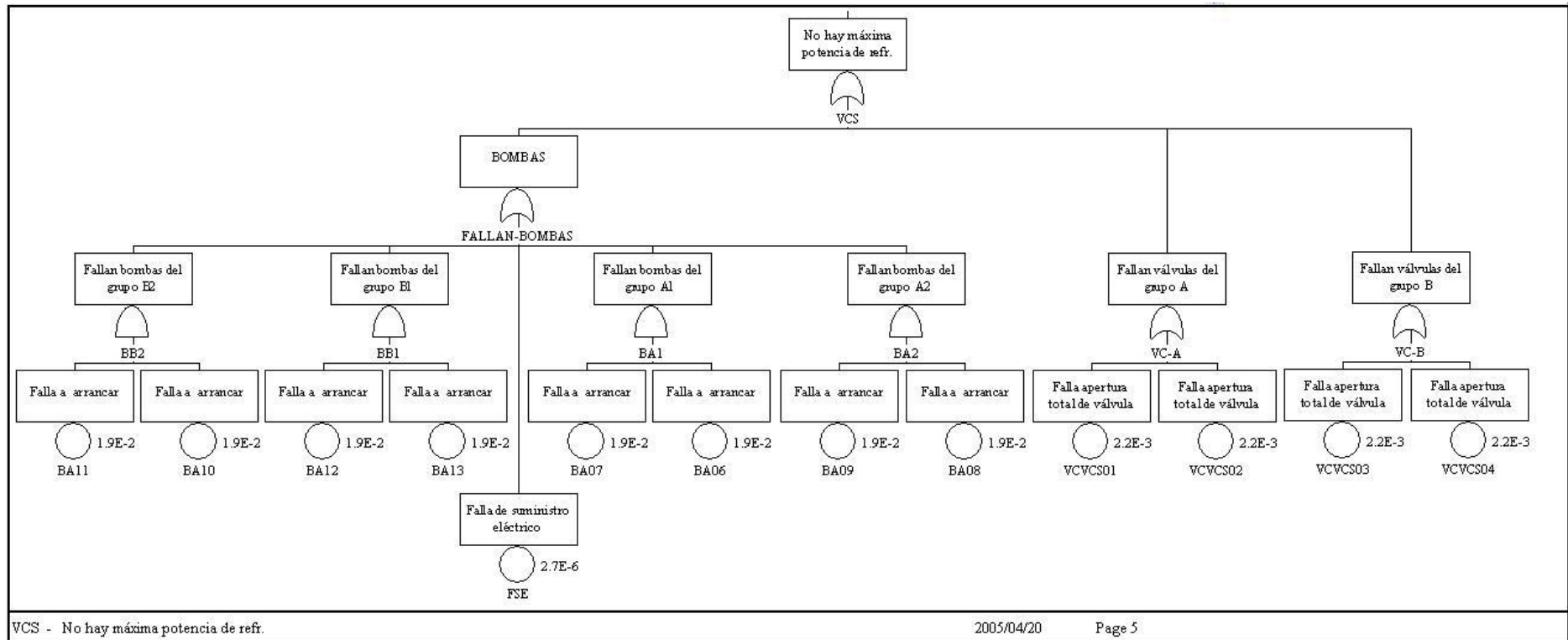
**Sistema de apagado (APAG).**



**Sistema de desviación de Helio al PPWC (DES).**

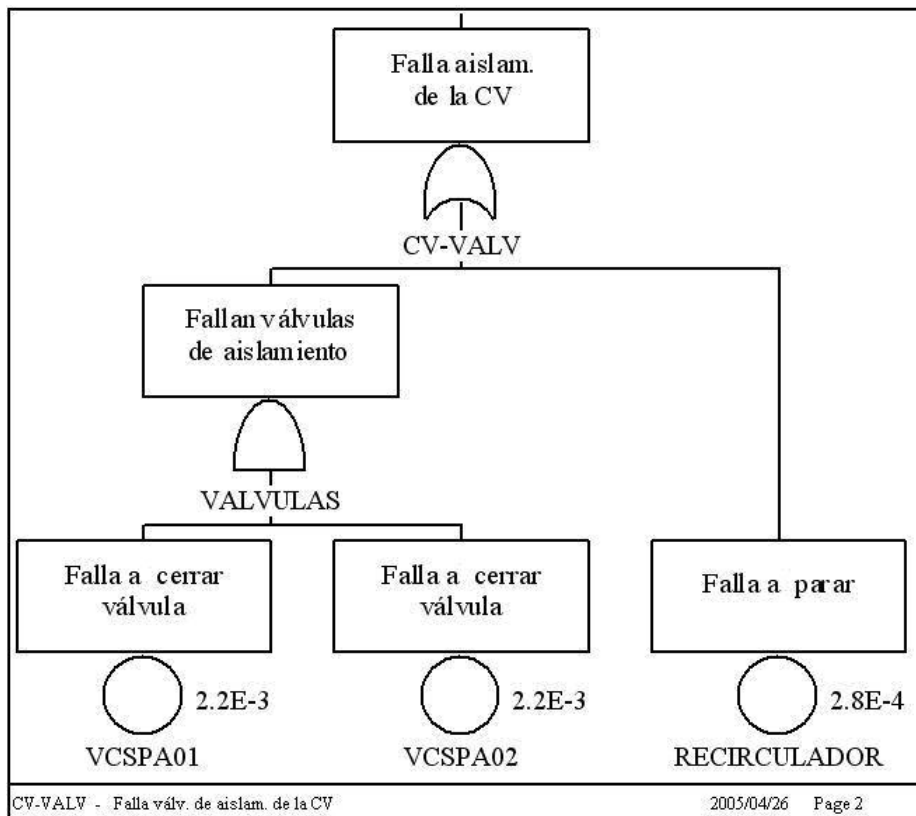


**Sistema de cierre de suministro de metano (META).**



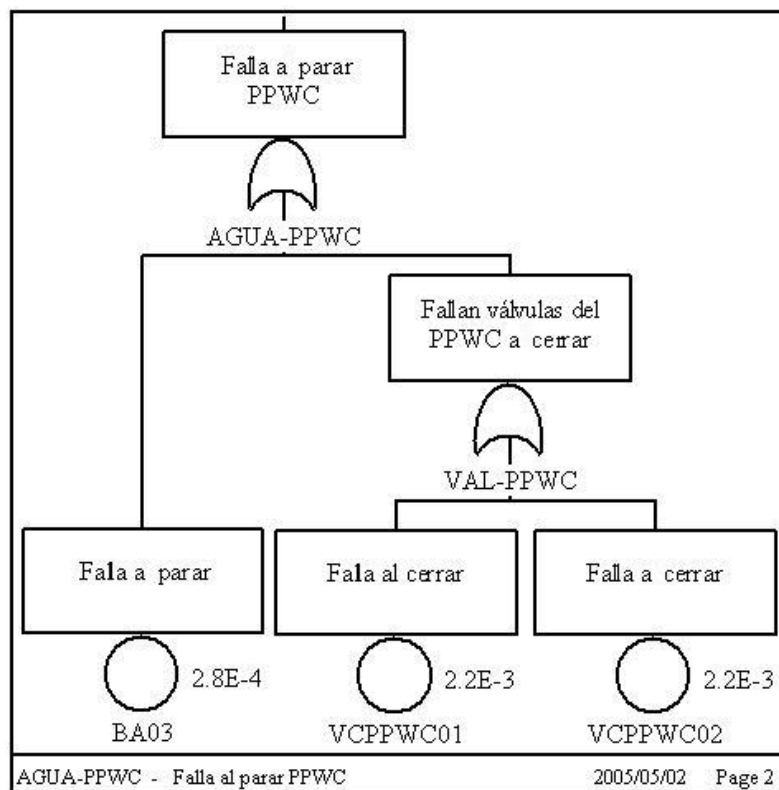
### Sistema VCS (VCS).

### Evento Iniciador RU-HE.



### Aislamiento de la contención de la vasija (CV-VALV).

### Evento Iniciador RU-PPWC



## Sistema de paro de agua al PPWC (AGUA-PPWC). ANEXO C

### Análisis de Incendio de Metano [7]

En este anexo se presenta con mayor detalle el análisis de incendio que se describe en el capítulo 5; se introducen las ecuaciones y las tablas con los parámetros necesarios para dicho análisis.

Una BLEVE (explosión de vapor debido a la expansión de un líquido hirviente: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) puede resultar de una rápida descarga y vaporización de un químico volátil, seguido de una ruptura catastrófica de un tanque, el cual contiene un químico con un punto de ebullición atmosférica debajo de la temperatura ambiente. El mayor peligro de una BLEVE es la intensa radiación térmica producida. Los efectos de presión, más allá del campo cercano, no son importantes. Generalmente, sólo unos fragmentos se generan, pero éstos son grandes y pueden viajar a unos 1000 metros. Las características de una bola de fuego pueden ser estimadas con los modelos presentados por Moorhouse y Pritchard, y Roberts [7].

Estas ecuaciones están basadas en estimaciones de incidentes reales.

El radio de la bola de fuego,  $r$ , en metros está dada por

$$r = 2.665m^{0.327} \quad (10)$$

donde la masa del químico liberado,  $m$ , es dado en kilogramos.

La duración de la bola de fuego en segundos,  $t$ , puede ser calculada por

$$t = 1.089m^{0.327} \quad (11)$$

La radiación de energía liberada por la bola de fuego en Joules,  $Q$ , es

$$\frac{Q_R}{t} = \frac{H_c m \eta}{t} \quad (12)$$

donde,  $H_c$  es el calor de combustión en J/Kg y la fracción de radiación,  $\eta$ , está dada por Roberts como

$$\eta = 0.27 P_o^{0.32} \quad (14)$$

donde,  $P_o$  es la presión inicial de almacenamiento del compuesto químico en MPa. El flujo de radiación de calor fuera de la bola de fuego puede ser estimado por la ecuación

$$q_R = \frac{(Q_R / t)}{A_r} \quad (15)$$

donde,  $A_r$  es el área semiesfera con radio  $r$ .

A continuación se muestran las consecuencias de un accidente de ruptura en la línea de metano, en la cual se logra detener el suministro de metano, pero se acumula una cantidad de gas, debido al tiempo en que se tardó en cortar el suministro de metano.

### Variables y sus unidades para el análisis de flujo de radiación de calor.

Fración de radiación	n.
Calor de combustión	Hc [J/Kg]
Masa	m [Kg]
Radio de la bola de fuego	r [m]
Duración de la bola de fuego	t [s]
Energía radiada	Qr [J]
Potencia radiada	Qr/t [KW]
Flujo de radiación de calor	qr [KW/m <sup>2</sup> ]
Distancia del centro de la bola de fuego	r [Km]
Área de la semiesfera	A [m <sup>2</sup> ]
Tiempo de reparación	T[m]

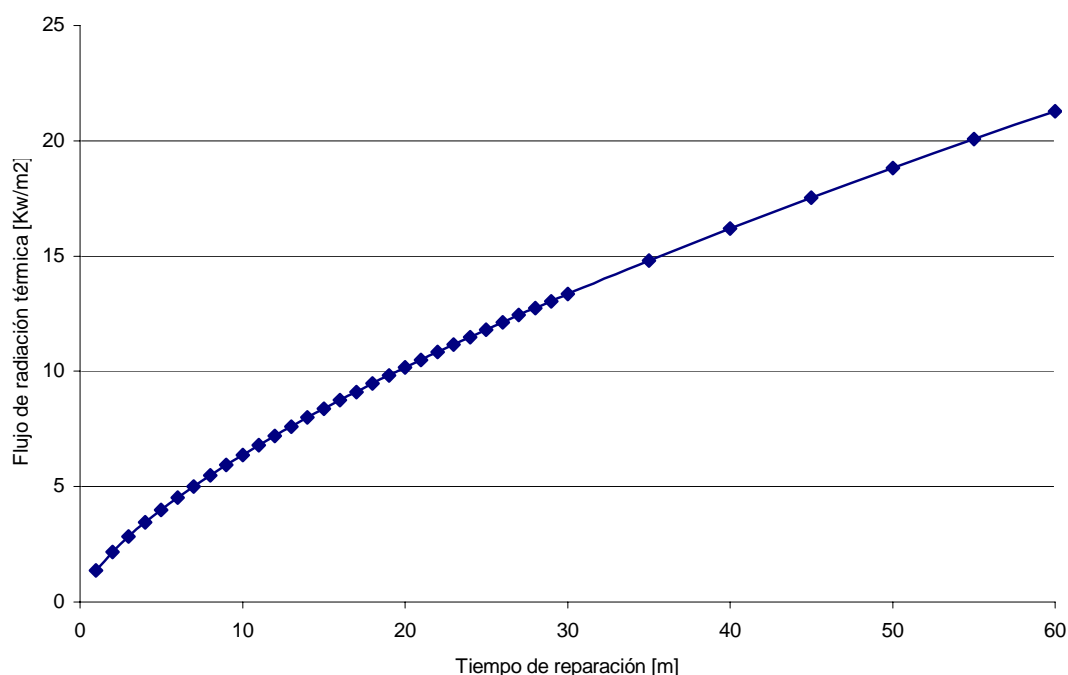
Las siguientes tabla y figura muestran el flujo de radiación de calor (qr) contra el tiempo de reparación (T) de la bomba BM01, a una distancia de 100 metros del centro del incendio.

### Resultados del análisis de radiación térmica.



T	m	Hc	n	r	t	Qr	KW*s	Qr/t	A	qr
1	23.33	55570470	0.2	7.46	3.05	259328823	259328.82	85014.7967	62832	1.353
2	46.67	55570470	0.2	9.36	3.83	518657645.9	518657.65	135546.313	62832	2.157
3	70.00	55570470	0.2	10.69	4.37	777986468.9	777986.47	178072.61	62832	2.834
4	93.33	55570470	0.2	11.75	4.80	1037315292	1037315.3	216113.001	62832	3.44
5	116.67	55570470	0.2	12.64	5.16	1296644115	1296644.1	251131.583	62832	3.997
6	140.00	55570470	0.2	13.41	5.48	1555972938	1555972.9	283916.29	62832	4.519
7	163.33	55570470	0.2	14.10	5.76	1815301761	1815301.8	314952.82	62832	5.013
8	186.67	55570470	0.2	14.73	6.02	2074630584	2074630.6	344567.317	62832	5.484
9	210.00	55570470	0.2	15.31	6.26	2333959407	2333959.4	372992.182	62832	5.936
10	233.33	55570470	0.2	15.85	6.48	2593288230	2593288.2	400400.417	62832	6.373
11	256.67	55570470	0.2	16.35	6.68	2852617052	2852617.1	426925.207	62832	6.795
12	280.00	55570470	0.2	16.82	6.87	3111945875	3111945.9	452671.862	62832	7.204
13	303.33	55570470	0.2	17.27	7.06	3371274698	3371274.7	477725.47	62832	7.603
14	326.67	55570470	0.2	17.69	7.23	3630603521	3630603.5	502156.037	62832	7.992
15	350.00	55570470	0.2	18.10	7.39	3889932344	3889932.3	526022.036	62832	8.372
16	373.33	55570470	0.2	18.48	7.55	4149261167	4149261.2	549372.946	62832	8.744
17	396.67	55570470	0.2	18.85	7.70	4408589990	4408590	572251.111	62832	9.108
18	420.00	55570470	0.2	19.21	7.85	4667918813	4667918.8	594693.123	62832	9.465
19	443.33	55570470	0.2	19.55	7.99	4927247636	4927247.6	616730.88	62832	9.816
20	466.67	55570470	0.2	19.88	8.12	5186576459	5186576.5	638392.399	62832	10.16
21	490.00	55570470	0.2	20.20	8.26	5445905282	5445905.3	659702.464	62832	10.5
22	513.33	55570470	0.2	20.51	8.38	5705234105	5705234.1	680683.126	62832	10.83
23	536.67	55570470	0.2	20.81	8.50	5964562928	5964562.9	701354.123	62832	11.16
24	560.00	55570470	0.2	21.10	8.62	6223891751	6223891.8	721733.205	62832	11.49
25	583.33	55570470	0.2	21.39	8.74	6483220574	6483220.6	741836.412	62832	11.81
26	606.67	55570470	0.2	21.66	8.85	6742549397	6742549.4	761678.302	62832	12.12
27	630.00	55570470	0.2	21.93	8.96	7001878220	7001878.2	781272.133	62832	12.43
28	653.33	55570470	0.2	22.19	9.07	7261207043	7261207	800630.03	62832	12.74
29	676.67	55570470	0.2	22.45	9.17	7520535866	7520535.9	819763.114	62832	13.05
30	700.00	55570470	0.2	22.70	9.28	7779864689	7779864.7	838681.619	62832	13.35
35	816.67	55570470	0.2	23.87	9.76	9076508803	9076508.8	930362.752	62832	14.81
40	933.33	55570470	0.2	24.94	10.19	10373152918	10373153	1017843.24	62832	16.2
45	1050.00	55570470	0.2	25.92	10.59	11669797033	11669797	1101809.58	62832	17.54
50	1166.67	55570470	0.2	26.83	10.96	12966441148	12966441	1182772.81	62832	18.82
55	1283.33	55570470	0.2	27.68	11.31	14263085262	14263085	1261126.38	62832	20.07
60	1400.00	55570470	0.2	28.48	11.64	15559729377	15559729	1337181.35	62832	21.28

Flujo de radiación térmica vs Tiempo de reparación.



**Relación del flujo de calor de acuerdo al metano acumulado debido al tiempo de reparación de BM01.**

Los efectos a la salud humana causados por diferentes niveles de radiación térmica se muestran en la siguiente tabla. Considerando un tiempo de reparación de la bomba BM01 de 10 minutos, se tendría un flujo de radiación térmica de 6.4 KW/m<sup>2</sup> a 100 metros de distancia, que causaría quemaduras de segundo grado después de 20 segundos de exposición.

**Efectos del flujo de calor en la salud humana y materiales.**

Flujo de Calor (KW/m <sup>2</sup> )	Efecto.
1.75	Se alcanza el umbral del dolor después de 1 minuto.
2	Daño al aislante de PVC de los cables.
5	Se alcanza el umbral del dolor después de 15 segundos.
6.4	Se alcanza el umbral del dolor después de 8 segundos, quemaduras de segundo grado después de 20 segundos.
12.5	La madera se enciende en una exposición prolongada en presencia de llama
15	Límite para materiales de construcción clase 2.
16	Severas quemaduras después de 5 segundos.
25	La madera se enciende en una exposición prolongada.
30	Limite para materiales de construcción clase 1.

## REFERENCIAS

1. Riley, R.Q., "Alternative cars in the 21st Century", SAE, Warrendale, USA, 1994.
2. Gulati, S.T., "Advanced Three-Way Converter System for High Temperature Exhaust Aftertreatment", SAE 970265, 1997.
3. "Report-JAERI 1332",  
[http://www2.tokai.jaeri.go.jp/htrr/eng/report\\_eng.html](http://www2.tokai.jaeri.go.jp/htrr/eng/report_eng.html) (2005).
4. Inagaki Y., Nishihara T et al, "Research and Development Program on HTRR Hydrogen Production System", *Memories of the International Conference on Global Environment and Advanced Nuclear Power Plants*, Kyoto, Japón, 15-19 de Septiembre (2003), Memorias en CDROM.
5. American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables*, American Institute of Chemical Engineers, New York, E.U. (1989).
6. D.A. Copinger, D. L. Moses, *Fort Saint Vrain Gas Cooled Reactor Operational Experience*, Division of Systems Analysis and Regulatory Effectiveness Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, E.U. (2004)
7. H. R.Greenberg, J.J. Cramer, *Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry*, Van Nostrand Reinhold, New York, E.U (1991)
8. Kugeler, K., et al., The Pebble-Bed High Temperature Reactos as Source of Nuclear Process Heat, Vol 4: System Considerations on Nuclear-Heated Steam Reformers, Report Jül-1116-RG, Research Center Jülich (1974)
9. Singh, Y., et al., The Nuclear Heated Steam Reformer-Design and Semitechnical Operating Experiences, Nucl. Eng. Des. 78 (1984) 179-194.
10. Hada, K., Improvements of Reforming Performance of a Nuclear Heated Steam Reforming Process, Report JAERI-Research-96-054, Japan Atomic Energy Research Institute (1996)
11. Miyamoto, Y., et al., Overview of HTGR Utilization System Developments at JAERI, High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) Development, (Techn. Comm. Meeting, Johannesburg, South Africa, 1996)
12. Hada, K., et al., Universally Applicable Design Concept of Stabbly Controlling an HTGR Hydrogen Production System, Nippon Genshiryoku Gakkai-Shi 38 (1996) 834-844.
13. Ohashi, H., et al., Performance Test Results of Mock-up Test Facility of HTRR Hydrogen Production System, Technical Data, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 41, Nº. 3, p. 385-392, (March 2004).
14. Flores y Flores A. "Análisis Preliminar de un Sistema Generador de Hidrógeno Utilizando Hidrocarburos y el Aprovechamiento del sitio de Laguna Verde" Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería – UNAM (2004)
15. R. A. Bari, et al., "Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide," NUREG/CR-2815 [BNL-NUREG-51559], Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, August 1985.