

PROYECTO INTEGRADOR
CARRERA DE INGENIERÍA NUCLEAR

DESARROLLO DE MODELOS PARA UN
REACTOR INTEGRADO Y SIMULACIÓN Y
ANÁLISIS DE ACCIDENTES SEVEROS CON EL
CÓDIGO MELCOR

Pablo Hernán Ilardo

Director

Ing. Juan Matías García

Codirector

Ing. Sergio Gabriel Sánchez

Instituto Balseiro
Comisión Nacional de Energía Atómica
Universidad Nacional de Cuyo

Junio 2012

Índice de Contenidos

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 3 |
| Abstract | 4 |
| Objetivo y motivación del trabajo..... | 5 |
| Capítulo 1: Introducción al accidente severo..... | 6 |
| 1.1 Definición de accidente severo | 6 |
| 1.2 Etapas del accidente severo y fenomenología característica | 6 |
| 1.2.1 Etapas In-Vessel | 6 |
| 1.2.2 Etapas Ex-Vessel..... | 8 |
| Capítulo 2: Fenomenología del hidrógeno en el accidente severo (Z.M. Shapiro 1957) | 12 |
| 2.1 Generación del Hidrógeno (Wilson y Araj 1985)..... | 12 |
| 2.2 Combustión del hidrógeno en un accidente severo | 13 |
| 2.2.1 Reacciones posibles de combustión del hidrógeno (Kuo 2005)..... | 13 |
| 2.2.2 Límites de inflamabilidad | 14 |
| 2.2.3 Ignición | 15 |
| 2.2.4 Propagación de la llama en la mezcla Hidrógeno-Aire..... | 15 |
| 2.3 Influencia del tamaño y forma de los recintos de combustión..... | 16 |
| 2.4 Influencia de la presión en los límites de combustión | 16 |
| 2.5 Influencia de la temperatura en los límites de combustión | 17 |
| 2.6 Estratificación del hidrógeno | 17 |
| 2.7 Efecto de gases químicamente inertes en la mezcla hidrógeno-aire | 17 |
| 2.8 Efecto del vapor en los límites de combustión de la mezcla hidrógeno-aire | 17 |
| 2.9 Inicio de la detonación y transición deflagración-detonación en la contención | 18 |
| Capítulo 3: Descripción del código MELCOR (SNL 2005)..... | 20 |
| 3.1 Introducción y alcance del código..... | 20 |
| 3.2 Paquete “Control Volumen Hydrodynamics” (CVH) | 21 |

| | | |
|---|--|----|
| 3.3 | Paquete “Flow Path” (FL) | 23 |
| 3.4 | Paquete “Heat Structure” (HS)..... | 24 |
| 3.5 | Paquete BUR | 26 |
| 3.6 | Paquetes “Tabular Function” (TF) y “Control Function” (CF)..... | 27 |
| Capítulo 4: Ejercicios propuestos en el 5º Workshop para Usuarios de MELCOR (SNL, 2001).. | | 28 |
| Capítulo 5: Descripción breve de un reactor integrado | | 31 |
| 5.1 | Introducción | 31 |
| 5.2 | Sistema Primario | 31 |
| 5.3 | Contención del reactor integrado | 32 |
| Capítulo 6: Modelo base de la contención de un reactor integrado | | 35 |
| 6.1 | Descripción del modelo inicial | 35 |
| 6.2 | Pruebas y modificaciones realizadas al modelo inicial de la contención - Desarrollo del modelo base | 39 |
| 6.3 | Pruebas y Conexión entre atmósfera de la Pileta Supresora y el Recinto Central | 39 |
| 6.4 | Conexión directa del Recinto Seco Inferior con el Recinto Seco Central | 40 |
| Capítulo 7: Simulaciones de secuencias accidentales y desarrollo del problema | | 43 |
| 7.1 | Postulados y condiciones de las simulaciones | 43 |
| 7.2 | Descripción de la Secuencia Accidental Base (SAB) - LOCA 0,5” en el recinto central con una tasa de liberación de hidrógeno de 5 kg/h..... | 43 |
| 7.3 | Efecto del tamaño de la rotura en el desarrollo del accidente..... | 49 |
| 7.4 | Efecto de la posición de la rotura dentro de la contención | 50 |
| 7.5 | Efecto de la tasa de generación de hidrógeno..... | 53 |
| 7.6 | Efecto de la nodalización del recinto central | 55 |
| 7.6.1 | Resultados del modelo 1D de nodalización | 58 |
| 7.6.2 | Resultados del Modelo 2D de nodalización | 61 |
| Conclusiones | | 65 |
| Bibliografía | | 68 |
| Agradecimientos | | 69 |

Resumen

En el presente trabajo, se realizó un estudio de la fenomenología y de las principales variables involucradas en los accidentes severos de reactores nucleares. Se analizaron los períodos del accidente en los cuales tiene lugar la generación y liberación del hidrógeno para estudiar la distribución del mismo en la contención del reactor una vez que abandona el circuito primario.

Se estudiaron los mecanismos de combustión de mezclas de hidrógeno con aire y vapor de agua, las reacciones químicas relevantes y las relaciones entre ellas. También se definieron los límites y condiciones de concentración para los cuales tiene lugar la combustión auto-sostenida del hidrógeno, estableciendo la importancia del oxígeno, vapor de agua y otros diluyentes de la mezcla. Esto último se interpretó gráficamente mediante la introducción del diagrama de Shapiro-Moffette. Se estudió la forma en que se produce la ignición del combustible y se describieron las características del avance de la llama y los factores que modifican los límites de inflamabilidad. El aprendizaje de estos principios que rigen la generación de hidrógeno y el comportamiento de la combustión fue importante para saber cuáles eran los factores a considerar para evaluar el progreso de un accidente y analizar los resultados de las simulaciones.

Se simularon accidentes de pérdida de refrigerante con liberación de hidrógeno a la contención de un reactor integrado. Se estudió y utilizó el código de cálculo MELCOR, desarrollado por Sandia National Laboratories, para elaborar un modelo base de la contención. Se realizó un análisis paramétrico de la influencia en el accidente de distintos factores, a saber: tamaño y posición de la rotura, tasa de liberación de hidrógeno y nodalización del modelo base.

Palabras clave: Reactor integrado, MELCOR, Accidente severo, Hidrógeno, Combustión, Contención, LOCA, Seguridad Nuclear.

Abstract

In this paper, a study about phenomenology and main variables involved in the progression of severe accidents in nuclear reactors was made. One of the main issues in the containment of a nuclear power plant under severe accident conditions is the hydrogen distribution and combustion. The stages of the accident in which the generation and release of hydrogen take place were analysed, in order to study its distribution in the containment after the release from the primary circuit.

The mechanisms of combustion of mixtures of hydrogen with air and steam, the relevant chemical reactions and the relationships between them were studied. The empirical known limits and concentration conditions required to have a self-sustained combustion of hydrogen, establishing the importance of oxygen, steam and other diluents of the mixture were also presented. The latter was interpreted graphically by introducing the Shapiro-Moffette diagram. The way in which fuel ignition occurs was studied and the characteristics of flame propagation and the factors that modify the flammability limits were described. The learning of the principles that govern hydrogen generation and combustion behaviour was important to know the main variables that should be considered in the analysis of the hydrogen issues for a particular severe accident simulation.

Simulations of Loss Of Coolant Accidents (LOCA) with release of hydrogen to the containment of an integrated type nuclear reactor were made, using the severe accident code MELCOR, developed by Sandia National Laboratories. Finally, parametric analyses to study the influence of several factors, namely size and position of the rupture, hydrogen release rate, and nodalization, were performed.

Keywords: Integrated reactor, MELCOR, Severe accident, Hydrogen, Combustion, Containment, LOCA, Nuclear Safety.

Objetivo y motivación del trabajo

En marzo de 2011 se produjo un accidente nuclear severo en algunos reactores de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi (Japón), con explosiones importantes debidas a la acumulación de hidrógeno y liberación de radionucleidos al ambiente. El terremoto y posterior tsunami que inició el accidente generaron preocupación alrededor del mundo, por lo que el accidente nuclear tuvo mucha repercusión en la opinión pública. Al mismo tiempo, las imágenes de las explosiones difundidas por los medios generaron en el público una sensación de desconfianza a la industria nuclear. Como consecuencia de este accidente, el tema del manejo del hidrógeno dentro de la contención en accidentes severos cobró mayor importancia en la industria nuclear, tanto en reactores en funcionamiento como en el diseño de nuevas instalaciones nucleares.

Los hechos acaecidos en el accidente nuclear de Fukushima fueron la principal motivación de este trabajo, en el cual se realizaron simulaciones de un accidente severo hipotético en la contención de un reactor integrado para analizar la distribución del hidrógeno. Este tipo de reactor presenta grandes mejoras respecto a la seguridad, por esto son una opción en la cual se está trabajando en distintos países, entre ellos la Argentina.

El objetivo del trabajo es, por un lado, investigar las variables más relevantes en lo que concierne a la distribución de hidrógeno en los recintos de la contención durante un accidente. Por otro lado, es plantear una discusión de los distintos modelos que pueden utilizarse para obtener esos datos a partir de simulaciones.

Un estudio de la evolución temporal de las variables de interés permite estimar las consecuencias de la generación de hidrógeno durante un accidente severo en la contención, predecir el progreso de la secuencia accidental y desarrollar los sistemas de mitigación correspondientes.

Capítulo 1: Introducción al accidente severo

En el presente capítulo, se define el accidente severo, luego se explica en forma general y sintética los principales fenómenos involucrados y finalmente se presentan más en detalle los fenómenos relacionados con el comportamiento del hidrógeno en la contención, que es el tema central de este trabajo (Wilson y Araj 1985)

1.1 Definición de accidente severo

En Seguridad Nuclear se denomina accidente severo o muy grave (severe accident) de una instalación nuclear a aquél en el cual se produce una fusión parcial o total de elementos combustibles, con la consecuente liberación de radionucleidos fuera de los mismos. El daño en los elementos combustibles se produce por su aumento de temperatura, debido a que la potencia térmica generada no es completamente extraída por el refrigerante. Los accidentes de pérdida de refrigerante en un reactor nuclear (Loss of Coolant Accident o LOCA) forman parte de los escenarios típicamente considerados en análisis de seguridad ya que, dada la falla de los sistemas de seguridad, podrían provocar la fusión del núcleo, lo que implica un accidente severo. Este tipo de secuencias serán analizadas en el presente trabajo.

1.2 Etapas del accidente severo y fenomenología característica

La fenomenología característica de un accidente severo puede analizarse dividiendo la progresión del mismo en dos grandes etapas: por un lado aquella que tiene lugar dentro del recipiente de presión (in-vessel); y por el otro la que tiene lugar fuera del mismo (ex-vessel).

1.2.1 Etapa In-Vessel

Los fenómenos típicos correspondientes a la etapa in-vessel de un accidente severo causado por una pérdida de refrigerante son, en orden de aparición, los siguientes:

- Pérdida de refrigerante y despresurización (Blow-down)
- Caída del nivel de líquido por ebullición del refrigerante (Boil-off)
- Descubrimiento del núcleo (core uncover)
- Calentamiento del núcleo (Heat up)

- Oxidación y degradación del núcleo (Core melt)
- Liberación de productos de fisión al primario
- Relocalización del material degradado a los niveles inferiores del RPV (Core slump)
- Falla del recipiente de presión debido al material fundido (Melt-through)

En la etapa in-vessel, la rotura de una cañería o la falla de una válvula en el circuito primario provocan en primera instancia la despresurización abrupta del recipiente de presión del reactor, impulsando agua y vapor hacia la contención (blow-down). Si no existe ningún sumidero de calor adicional, la temperatura de los elementos combustibles crece con el tiempo. En el caso de que los sistemas de seguridad no actúen correctamente, se produce un descenso en el nivel de refrigerante provocado por la ebullición del mismo (boil-off). Este fenómeno continúa y el núcleo comienza a descubrirse (core uncover).

En la siguiente etapa, el núcleo descubierto se calienta a temperaturas mayores a la de ebullición del agua (heat-up), hasta llegar al punto de fusión de las vainas primero, y de los pellets después, que integran los elementos combustibles. Durante esta etapa, el calentamiento de las vainas combustibles por arriba de 1000 K provoca su deformación e hinchamiento (swelling) debido a los esfuerzos mecánicos producidos por las altas temperaturas. Se comienzan a liberar argón (Ar), kriptón (Kr) y los productos de fisión más volátiles: cesio (Cs), yodo (I) y telurio (Te), que reaccionan formando aerosoles. Cuando la temperatura del núcleo es de aproximadamente 1300 K, el vapor comienza a reaccionar químicamente de manera apreciable con el circonio de las vainas descubiertas, generando una fuente de calor adicional, dado que dicha reacción de oxidación es altamente exotérmica. A los 1500 K, la energía liberada por la oxidación del Zr es comparable a la potencia de decaimiento generada localmente en el núcleo y el hidrógeno producido en la oxidación se mezcla con el vapor presente en el recipiente de presión. A altas temperaturas, el dióxido de uranio de los pellets reacciona con el circonio generando una fase eutéctica cuyo punto de fusión es inferior al del pellet. En la Figura 1 se muestran los valores críticos de temperaturas durante el heat-up del núcleo.

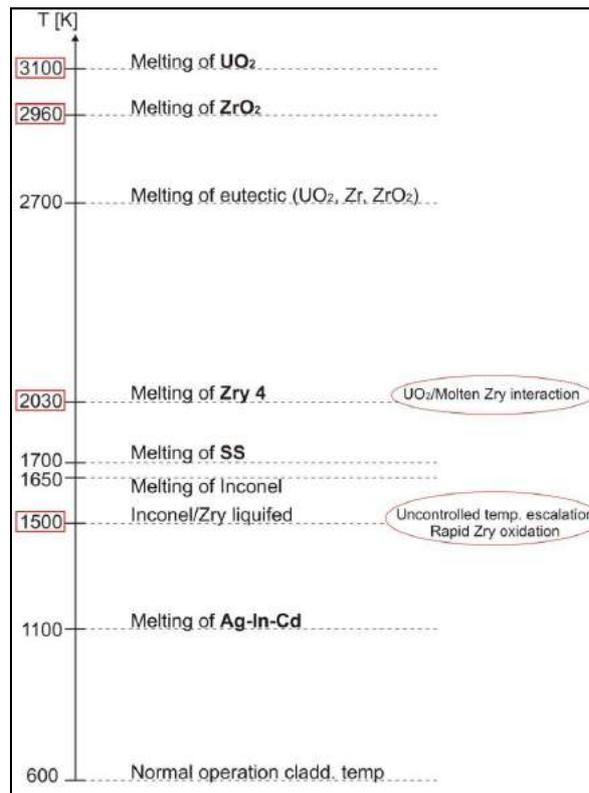


Figura 1: Temperatura de fusión de distintos materiales de interés en la industria nuclear

A los 2030 K se funden las vainas de zircaloy 4 (Zry 4), y a los 2700 K lo hace la fase eutéctica formada en los pellets. El dióxido de uranio restante se funde a los 3100K. La fusión total del núcleo y su posterior caída sobre la grilla de soporte inferior provoca la destrucción de la misma, de forma tal que el material fundido se traslada hacia la parte más baja del recipiente de presión (plenum inferior o lower plenum). El contacto del material fundido con el refrigerante presente en dicha zona acelera la generación de vapor e incrementa la presión en el circuito primario. Al cabo de un tiempo puede producirse la falla del recipiente de presión por el contacto de la estructura del cabezal inferior (lower head) con el material fundido o colapsado del núcleo. Posteriormente, el corium cae hacia la contención, comenzando la etapa ex-vessel del accidente.

1.2.2 Etapa Ex-Vessel

Los fenómenos característicos más relevantes que pueden ocurrir luego de la falla del recipiente de presión son los siguientes:

- Aumento de la presión en la contención

- Interacción entre el corium y el refrigerante de la contención (Fuel-Coolant Interaction o FCI)
- Interacción entre el corium y el hormigón (Molten Core-Concrete Interaction o MCCI)
- Producción, transporte y combustión del hidrógeno
- Generación, transporte y deposición de aerosoles
- Falla de la contención

En la etapa ex-vessel del accidente, cuando el corium fundido entra en contacto con el refrigerante en la contención (FCI) pueden originarse reacciones químicas energéticas y explosiones de vapor con aumentos importantes de presión en la contención. Las consecuencias de dicha interacción pueden ser:

- Daños de estructuras y sistemas en la contención por sobrepresiones locales.
- Impactos de objetos o misiles con estructuras debido a variaciones bruscas de presión.
- Fugas de refrigerante a través de las penetraciones de la contención.
- Producción de escombros de corium resolidificado o “debris” en la interacción que dificultan la refrigeración.
- Liberación adicional de productos de fisión.

La presión de la contención puede aumentar a valores que provoquen su rotura debido a la gran cantidad de vapor y gases con alta energía que se liberan en la misma. En el hipotético caso de que resulte dañada la contención, el momento en el que se produzca la rotura es crucial en cuanto a las consecuencias radiológicas del accidente. Esto se debe a que una falla temprana produciría una liberación muy alta de radionucleidos al medio, mientras que una liberación tardía otorga mayor tiempo para la deposición de radionucleidos en la contención, disminuyendo notablemente la magnitud de la liberación al ambiente. Si la contención no falla al inicio de la etapa ex-vessel, la presión en la misma tiende a descender debido a la condensación del vapor en las superficies de paredes y otras estructuras presentes.

De no existir agua en la parte inferior de la contención, la interacción entre el corium y el concreto (MCCI) produciría vapor y gases como dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO) provocando un aumento de la presión en la contención que puede ser importante en caso de producirse la combustión de los gases inflamables.

Los productos de fisión entran en la contención luego de la rotura del circuito primario, de donde escapan gases y una gran proporción de éstos se condensan en forma de aerosoles. En la contención, los aerosoles son transportados y depositados por distintos procesos, según se muestra en la Figura 2. El comportamiento de los aerosoles se modela considerando la evolución temporal de la masa, tamaño, composición y localización de las partículas.

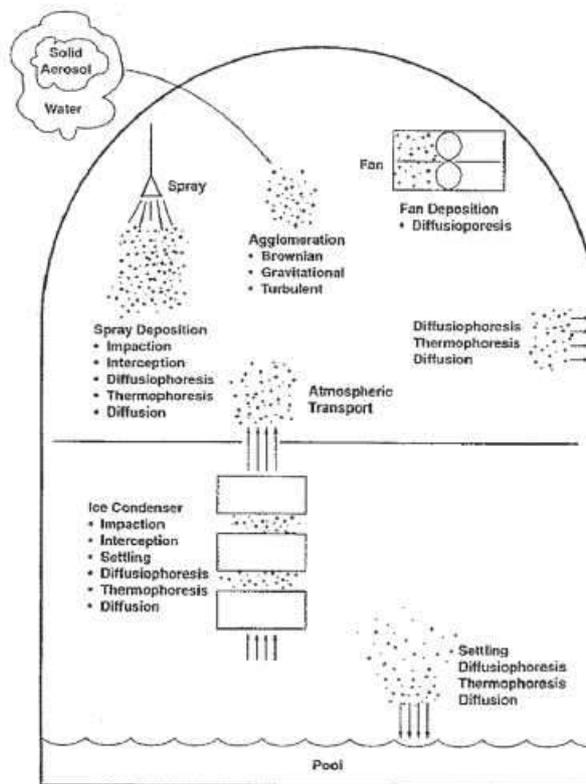


Figura 2: Comportamiento de aerosoles considerado en el análisis de la contención (IAEA, 2008)

En la Figura 3 se muestra en un esquema en bloques la relación existente entre las etapas in-vessel y ex-vessel del accidente mencionadas anteriormente.

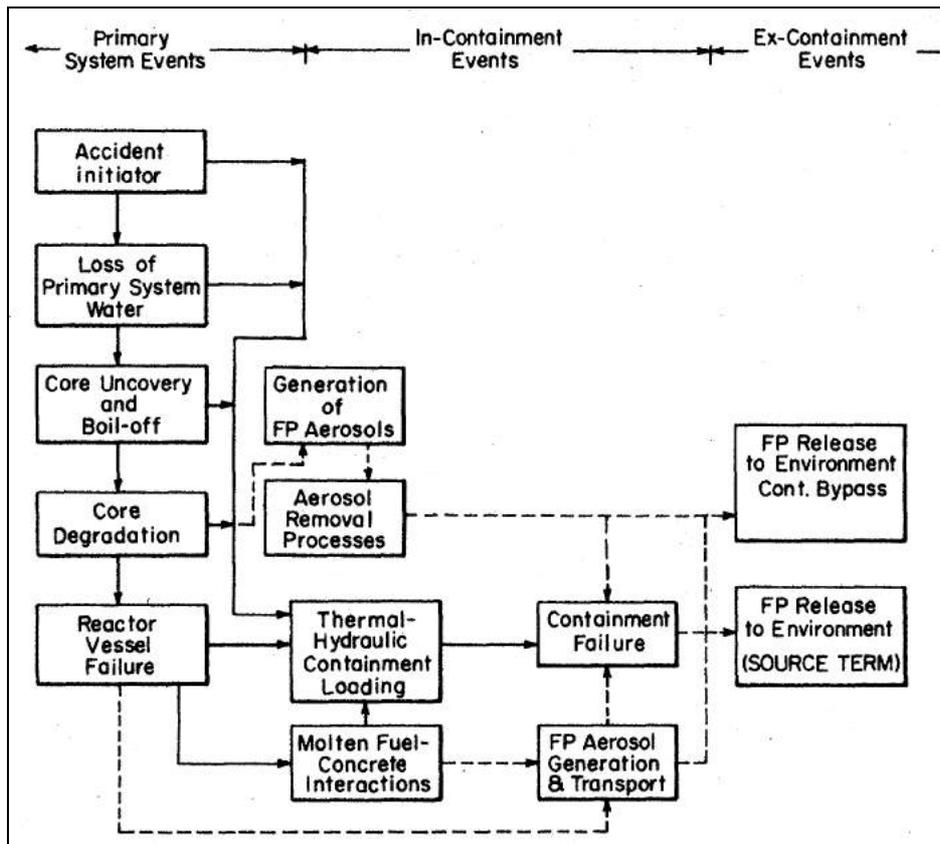


Figura 3: Diagrama en bloques de las etapas características en la evolución de un accidente severo. Los fenómenos termohidráulicos se relacionan mediante líneas gruesas; los de líneas punteadas corresponden a los procesos de aerosoles y productos de fisión (Wilson & Araj, 1985)

Capítulo 2: Fenomenología del hidrógeno en el accidente severo (Z.M. Shapiro 1957)

En este capítulo, se describen los procesos de generación de hidrógeno en un accidente severo, se explican los principios básicos de combustión del hidrógeno y se introducen los conceptos más relevantes respecto a las condiciones, límites y formas de propagación de una deflagración.

2.1 Generación del Hidrógeno (Wilson y Araj 1985)

En un accidente severo, las fuentes de hidrógeno más importantes provienen de la oxidación de metales, como el circonio de las vainas combustibles con el vapor. Esta reacción puede ocurrir en diferentes estadios del accidente, a saber:

- Período inicial de la degradación del núcleo, con el combustible en su geometría original, a altas temperaturas (típicamente mayores a 1300 K)
- Relocalización del material fundido posterior a la falla del combustible, donde se exponen nuevas superficies a la reacción.
- Relocalización del material fundido en el lower plenum del recipiente de presión.
- Eyección del material fundido en forma de jet.
- Interacción entre el corium y el concreto de la contención.

Como se mencionó, cuando la temperatura es mayor a 1300K, la reacción de oxidación del circonio de las vainas con el vapor de agua comienza a ser relevante, liberando hidrógeno dentro del recipiente de presión.



donde la energía liberada en la reacción es $\Delta H(kJ/mol) = 617,92 - 2,234 \cdot 10^{-2} \cdot T(K)$

(Lemmon 1957).

La reacción que se muestra en (1) es altamente exoérgica y es más intensa cuanto más alta es la temperatura. Esta realimentación positiva en la energía liberada es la responsable de que la temperatura del núcleo se dispare en forma exponencial al llegar a esta fase del accidente. A aproximadamente 1500 K, la energía liberada por la reacción de oxidación puede ser comparable incluso a la potencia de decaimiento.

2.2 Combustión del hidrógeno en un accidente severo

En esta sección se presentan las reacciones que tienen lugar en la combustión del hidrógeno y se definen las condiciones necesarias y límites para que la reacción tenga lugar. A su vez, se presentan las variables que influyen en los límites de combustión y se explica brevemente la forma de propagación de la combustión auto-sostenida.

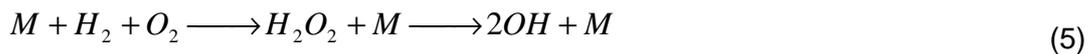
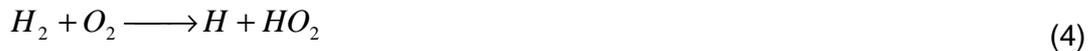
2.2.1 Reacciones posibles de combustión del hidrógeno (Kuo 2005)

La combustión del hidrógeno con el oxígeno viene dada por la expresión



Sin embargo, la reacción global propuesta en (2) es una simplificación de una serie de reacciones más elementales presentes en la combustión a través de especies químicas intermedias. Por tanto, la combustión del hidrógeno puede dividirse en reacciones de iniciación, reacciones en cadena y reacciones de terminación.

De acuerdo a lo propuesto por Glassman (Glassman 1987), la oxidación del H_2 puede dividirse en muchos grupos de reacciones. Las reacciones de iniciación son:



Los pasos de la reacción en cadena que involucran O, H, y radicales OH son:



Los pasos que finalizan la reacción en cadena son:



En las reacciones recién mencionadas, M es un tercer compuesto presente en la reacción pero que no interviene químicamente en la misma (p. ej. el nitrógeno (N₂) del aire). Las expresiones (6), (7), (8) y (9) son reacciones encadenadas entre sí y son las encargadas de acelerar la disociación del hidrógeno y oxígeno. El producto O de (6) es el reactivo de (7), que genera como producto el radical H que es reactivo en (6), creando una realimentación positiva en la disociación. El producto OH de (6) y (7) favorece la disociación de H₂ en (8), que es realimentada por la producción de OH en (9).

2.2.2 Límites de inflamabilidad

Se denominan “límites de inflamabilidad” a los valores de composición de una mezcla de gases (por ej. H₂-aire), para los cuales se produce la transición a la combustión de la mezcla. Una mezcla de gases combustibles posee generalmente dos límites de inflamabilidad, uno superior y otro inferior. El rango de concentración entre estos dos valores es la ventana de inflamabilidad, dentro de la cual se satisface la condición de combustión auto-sostenida. Cuando una mezcla se encuentra justo en el límite inferior de inflamabilidad, la energía que se libera en la reacción química es la necesaria para encender el combustible que aún no ha participado en la reacción, provocando la auto-propagación de la combustión. Así, el límite inferior puede verse como la condición mínima que se requiere para que una reacción se propague por sí misma. Cuando la concentración del combustible es mayor al límite superior de inflamabilidad, la propagación auto-sostenida de la combustión no se produce porque la energía liberada en la reacción se difunde excesivamente y no es suficiente para iniciar nuevas reacciones.

Dentro de los límites mencionados es posible que se produzca la combustión o detonación de la mezcla. Para el ejemplo de H₂-aire a condiciones normales de presión y temperatura, los límites superior e inferior para la concentración de hidrógeno son 4,1% y 74%, respectivamente. Estos límites dependen de la temperatura y presión de la mezcla y no indican qué tipo de combustión tiene lugar (detonación, explosión o simplemente quemado del combustible).

2.2.3 Ignición

Cuando una mezcla de gases se encuentra dentro de los límites de combustión, el encendido o ignición de la mezcla se produce al agregar una pequeña cantidad de energía adicional con una chispa o llama. Esta chispa puede ser invisible a la vista, siendo las más comunes las que provienen de la electrostática o de equipos eléctricos.

2.2.4 Propagación de la llama en la mezcla Hidrógeno-Aire

Si se posiciona una fuente de ignición en el centro de una mezcla combustible, se esperaría que la llama tienda a desplazarse isotrópicamente en todas direcciones. Esto ocurriría probablemente si no existiesen corrientes de convección producidas por los productos de combustión calientes, que desplazan la mezcla hacia arriba. Si la velocidad de propagación de la llama es menor a la velocidad de los gases dada por la corriente convectiva, la llama no puede desplazarse hacia abajo. Esto demuestra que el conocimiento de los límites de combustión debe venir asociado a la dirección de propagación de la llama. Para H₂-aire, el límite inferior de combustión es de 4,1% (propagación hacia arriba), 6% (propagación horizontal) y 9% (propagación hacia abajo). Los límites superiores de H₂-aire no están bien establecidos para las distintas direcciones y se asume el valor conservativo de 74% en todos los casos.

La combustión en la mezcla H₂-aire produce una llama pálida, que incluso puede ser invisible cerca de los límites de combustión. La llama se expande con la forma de un anillo, que luego se separa en esferas y se propagan hacia arriba. No todo el hidrógeno se quema, sino que solamente una fracción de éste interviene en la combustión. Por ejemplo, en una mezcla con 5,6% de H₂ reacciona el 50% del H₂ total, y la combustión solo ha de completarse si la fracción molar de H₂ alcanzara el 10%. Por lo tanto, al variar la concentración de H₂ en aire desde 4,1% hasta 10%, la energía liberada en la combustión se encuentra fuera de proporción respecto a la cantidad de H₂ presente.

Como se indicó antes, no es sino hasta alcanzar el 9% de H_2 que la llama puede propagarse en todas las direcciones. Por lo tanto, por debajo de esa concentración la peligrosidad de la combustión depende fuertemente de la localización del punto de ignición. Por ejemplo, si una mezcla tiene 4,1% H_2 homogéneamente distribuida y solo puede propagarse hacia arriba, una ignición muy cerca del techo de un compartimiento es menos peligrosa que una producida cerca del suelo, debido a que la primera tiene una duración mucho más corta que la segunda.

Cuando la concentración de H_2 se incrementa hasta el 9%, la propagación se produce en todas las direcciones y aumenta significativamente la velocidad de propagación. Al llegar la concentración de H_2 al 19% en aire se produce la detonación con velocidades de propagación supersónicas.

2.3 Influencia del tamaño y forma de los recintos de combustión

Puesto que la auto-propagación de la combustión en un recinto depende de la energía disponible para encender la mezcla fresca (que aún no participó de la reacción), los recintos que tienen una relación superficie-volumen alta actúan absorbiendo parte de la energía disponible, reduciendo la ventana de inflamabilidad. Por lo tanto, la forma y tamaño de los recintos influye en los límites de combustión.

2.4 Influencia de la presión en los límites de combustión

Las variaciones normales de la presión atmosférica no afectan los límites de inflamabilidad. Sin embargo, variaciones grandes de presión causan distintos efectos en mezclas diferentes, por lo cual no es posible generalizar. En el caso de H_2 -aire, el rango de combustión para la propagación hacia abajo se vuelve más angosto con un incremento moderado de presión. Entre 10 atm y 250 atm, el límite superior aumenta. Se ha demostrado experimentalmente que el límite inferior permanece aproximadamente constante entre 0,5 atm y 4 atm.

2.5 Influencia de la temperatura en los límites de combustión

Un aumento en la temperatura de la mezcla de gases reduce el límite inferior y aumenta el límite superior de inflamabilidad, debido a que se necesita menos energía proveniente de la reacción para propagar la combustión.

2.6 Estratificación del hidrógeno

El H_2 tiene una densidad más baja que la de otros gases, por lo cual la aparición de una cantidad de H_2 cerca del techo de un compartimiento significa una concentración preferencial en ese lugar, la cual debe tenerse en cuenta. Sin embargo, si la inserción del H_2 se produce en forma de jet o cerca del suelo, el H_2 se difunde por todo el volumen.

2.7 Efecto de gases químicamente inertes en la mezcla hidrógeno-aire

La adición de gases no reactivos en la mezcla H_2 -aire disuelve el combustible y provoca que los límites de combustión se aproximen, hasta solaparse para altas diluciones. Por ejemplo, se necesitan 11 volúmenes de He ó 10,2 volúmenes de CO_2 para que se solapen los límites de 1 volumen de H_2 -aire. Este mecanismo de dilución permite que puedan existir recintos con una gran masa de hidrógeno presente sin ningún tipo de riesgo de explosión o combustión. Por otro lado, el agregado de diluyentes puede utilizarse para reducir el riesgo de detonación en lugares que no posean hidrógeno pero que sean susceptibles a la acumulación del mismo.

2.8 Efecto del vapor en los límites de combustión de la mezcla hidrógeno-aire

El vapor de agua ha demostrado ser uno de los mejores diluyentes en la mezcla H_2 -aire para evitar la combustión. Si se precisan 10,2 volúmenes de CO_2 para anular la combustión de 1 volumen de H_2 -aire, se necesitarían solamente 7,6 volúmenes de vapor de agua para lograr el mismo efecto a presión atmosférica.

Se demostró experimentalmente que al aumentar la fracción molar de vapor, el límite superior de combustión decrece rápidamente, mientras el límite inferior crece en forma

más lenta, hasta igualarse en 10% cuando la concentración de H₂O es de 60%. La Figura 4 presenta el diagrama de Shapiro-Moffette, uno de los más usados para analizar la mezcla H₂-aire-H₂O (g), y en donde se pueden apreciar gráficamente los límites de combustión y detonación de la mezcla para diferentes temperaturas y presiones.

Otro efecto que tiene el vapor de agua en las reacciones que intervienen en la combustión puede verse en la expresión (13). La aparición de H₂O en los productos de la reacción tiende a aumentar la cantidad de radicales H + OH, y esto reduce la disociación de H₂.

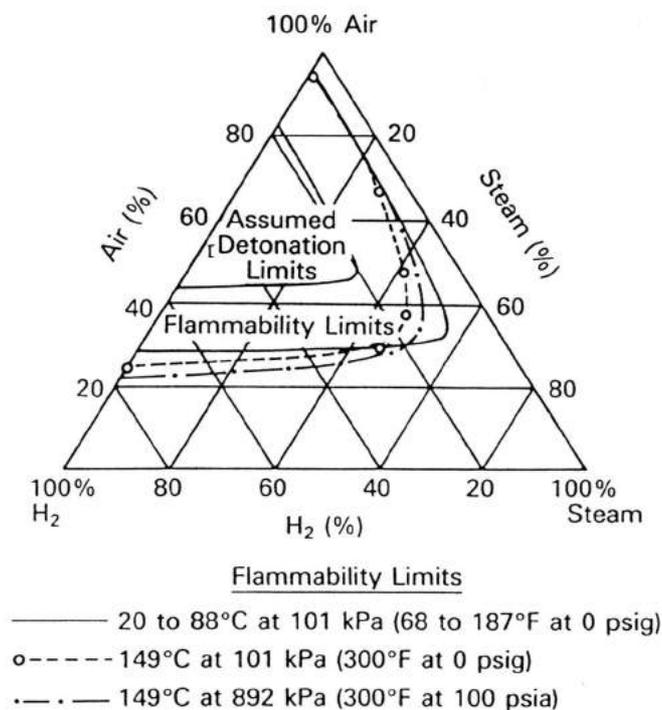


Figura 4: Límites de combustión y detonación de la mezcla H₂-Aire-H₂O(g) (Z.M. Shapiro, 1957)

2.9 Inicio de la detonación y transición deflagración-detonación en la contención

Teóricamente, una detonación puede iniciarse por una fuente de ignición intensa o, bajo ciertas circunstancias, debido a la aceleración de la llama luego de una deflagración. Este régimen de transición se conoce como “transición deflagración-

detonación” o DDT. También puede iniciarse una detonación debido a un jet caliente en régimen turbulento de productos de combustión que atraviesan la mezcla reactiva.

De acuerdo a la mayoría de las investigaciones realizadas, la posibilidad de una detonación directa por una fuente de ignición intensa es baja en la contención de una central nuclear debido a la alta energía que se necesita: del orden de 5 a 1000 kJ para mezclas H₂-Aire con contenidos de H₂ de 29,6 % y 17,4 %, respectivamente (C.M. Guirao 1989).

Por lo tanto, los mecanismos más probables de detonación son los indirectos, como el régimen DDT o el jet turbulento de productos de combustión. La aceleración de la llama es un prerrequisito para la transición DDT y generalmente se produce como consecuencia de la turbulencia que generan objetos, obstáculos y ventiladores en la contención.

Capítulo 3: Descripción del código MELCOR (SNL 2005)

En el presente capítulo se introduce el código de cálculo MELCOR y se describe el alcance del mismo y los paquetes principales utilizados en este trabajo.

3.1 Introducción y alcance del código

MELCOR es un código de cálculo de ingeniería desarrollado por Sandia National Laboratories (SNL) patrocinado por la autoridad regulatoria nuclear de Estados Unidos (US-NRC) que modela la progresión de accidentes severos en reactores nucleares de agua liviana, tanto en BWR's como en PWR's. Las aplicaciones de Melcor incluyen además el cálculo del término fuente (liberación de productos de fisión al ambiente) para su posterior uso en el cálculo de consecuencias radiológicas del accidente.

El modelado de un accidente severo por MELCOR se lleva a cabo por paquetes de código que incluyen:

- Respuesta termohidráulica del circuito primario de refrigeración, de la cavidad del reactor y de la contención.
- Descubrimiento y calentamiento del núcleo, oxidación de las vainas, degradación del combustible, fusión y relocalización
- La determinación de la carga térmica y mecánica en el cabezal inferior del recipiente de presión, así como la falla del mismo con la consecuente transferencia de materiales a la cavidad del reactor.
- Interacción núcleo-concreto y generación de aerosoles
- Producción del hidrógeno (in-vessel y ex-vessel), transporte del mismo y combustión en el interior y exterior del reactor.
- Liberación, transporte y deposición de los productos de fisión, estimando el término fuente durante un accidente severo.
- Comportamiento de aerosoles radiactivos en el edificio de la contención, incluyendo deposición en piletas de agua e interacción mecánica con superficies.
- Impacto de los sistemas de seguridad en la respuesta termohidráulica y el comportamiento de radionucleidos.

Los distintos paquetes de código resuelven problemáticas diferentes pero que interactúan entre sí, por lo cual comparten información de las variables en la ejecución del programa. La programación por paquetes que atacan distintos fenómenos favorece la actualización y mantenimiento del código.

3.2 Paquete “Control Volumen Hydrodynamics” (CVH)

El paquete CVH se encarga del cálculo de la transferencia de energía y cantidad de movimiento en lugares geométricos definidos mediante volúmenes de control.

La definición de la geometría espacial de un volumen de control se realiza mediante una tabla volumen/altitud. Cada fila de la tabla contiene la información del volumen que existe hasta una determinada altura desde la parte inferior del volumen de control, según se muestra en la Figura 5.

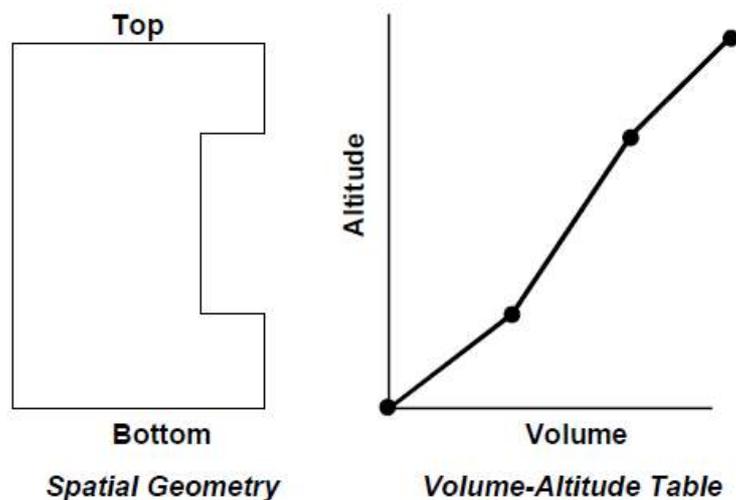


Figura 5: Definición de las características espaciales de un volumen de control con la tabla volumen/altitud (SNL, 2005)

El contenido de un volumen de control se divide en “pileta” y “atmósfera”, considerando que la pileta ocupa la parte más baja del volumen de control, y la atmósfera ocupa el resto. La pileta puede encontrarse en una fase líquida o en dos fases (líquido y vapor). Los gases no condensables solo pueden estar en la atmósfera, pero pueden interactuar e intercambiar energía con la pileta. La atmósfera se compone

por vapor de agua, gases no condensables y pequeñas gotitas de agua líquida que constituyen la llamada “niebla” (fog). El volumen total se divide como se muestra en la Figura 6. La superficie pelo líquido de la pileta se asume plana y su altura se calcula por interpolación de los datos de la tabla volumen/altitud. La fracción de vacío que utiliza el paquete CVH es una fracción promedio que se considera constante en la pileta. Los componentes se diferencian con números. Así, el número 1 representa la pileta (tanto agua como burbujas de vapor), el 2 representa la niebla y el 3 el vapor de agua de la atmósfera. Los componentes con números mayores a 3 son los gases no condensables, que tienen que ser definidos por el usuario.

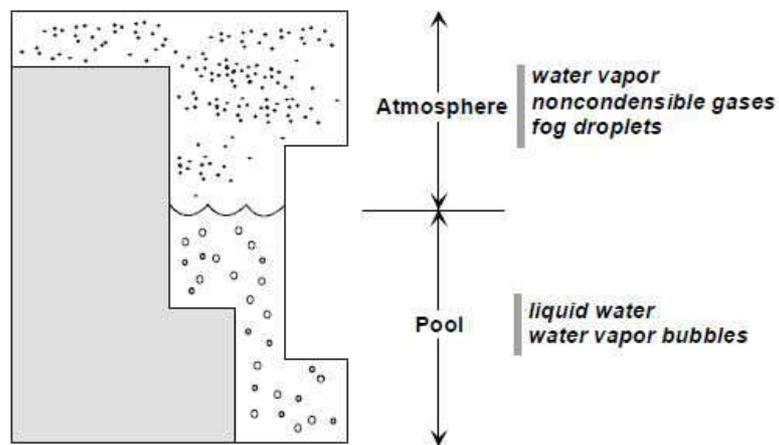


Figura 6: Contenido de un volumen de control y superficie de la pileta (SNL, 2005)

Las propiedades termodinámicas de un volumen de control vienen dadas, a partir de una ecuación de estado, cuando se definen los volúmenes y los contenidos en masa y energía del volumen de control.

En MELCOR, el equilibrio termodinámico en un volumen de control supone que la pileta y la atmósfera se encuentran en equilibrio térmico y mecánico, por lo que tienen la misma presión y temperatura. La condición de no-equilibrio en MELCOR supone que la presión es la misma en la pileta y en la atmósfera, pero que la temperatura es distinta, por lo cual existe el intercambio de energía entre ellas.

3.3 Paquete “Flow Path” (FL)

El paquete FL permite calcular la transferencia de masa y energía entre volúmenes de control vinculados entre sí mediante la definición y uso de “Flow Paths”. Un flow path es un camino que conecta dos volúmenes de control previamente definidos, y que posibilita la transferencia de masa y energía, resolviendo la ecuación de momento. Un flow path no posee masa, volumen o energía asociada a él mismo, por lo cual la masa y energía que son removidas de uno de los volúmenes son depositadas en el otro.

La geometría de un flow path viene dada por la especificación de un área y longitud. El área permite obtener la relación entre el caudal volumétrico y la velocidad del flujo, y la longitud se utiliza en la ecuación de momento. Cada flow path se divide en uno o varios segmentos caracterizados por un área, longitud, diámetro hidráulico, rugosidad, etc. Cada uno de los extremos de un flow path se denomina junta y se define por su elevación y altura de apertura, según se muestra en la Figura 7.

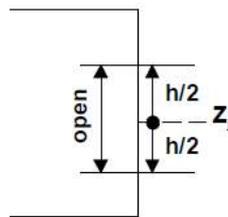


Figura 7: Especificación de la junta de un flow path (SNL, 2005)

La altura de la apertura y el nivel de la pileta indican si el flujo que atravesará el flow path pertenecerá a la pileta, atmósfera o ambos, y permite por lo tanto calcular la fracción de vacío, según se aprecia en la Figura 8. Los niveles de las juntas también permiten calcular diferencias hidrostáticas de presión.

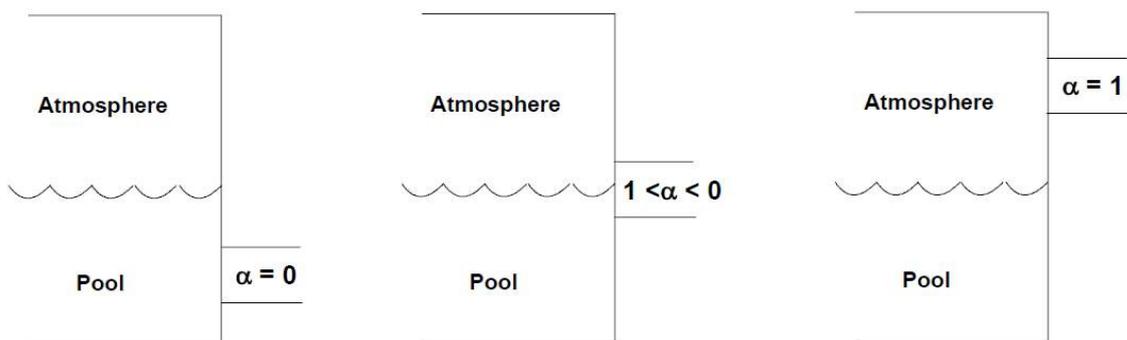


Figura 8: Cálculo de la fracción de vacío a partir de las alturas de la junta y el nivel de pileta (SNL, 2005)

Cuando se quiere modelar la unión infinitesimal entre dos volúmenes de control que tienen una superficie en común, se debe utilizar un flow path cuya longitud sea la distancia entre los centros de los volúmenes y la elevación de las dos juntas sea igual a la elevación media de la superficie que comparten los volúmenes. Este uso de los flow paths permite discretizar un problema para observar efectos que, de otra forma, no podrían apreciarse (ver ejemplo en la Figura 9).

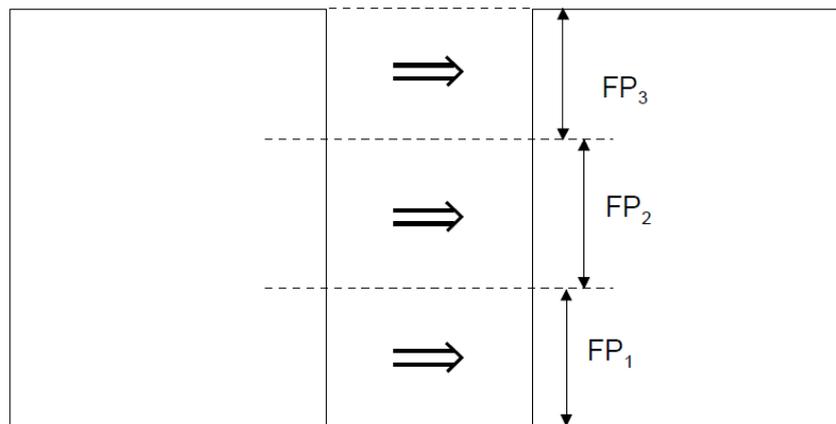


Figura 9: Modelización de la circulación natural utilizando varios flowpaths para conectar dos volúmenes (SNL, 2005)

3.4 Paquete “Heat Structure” (HS)

El paquete HS calcula la conducción del calor unidimensional en el interior de estructuras sólidas, y el intercambio de energía entre sus bordes y los volúmenes de control a los cuales están asociados. Este paquete permite modelar cualquier tipo de estructura que esté presente en el accidente, desde internos del recipiente de presión hasta paredes de la contención. Las estructuras modeladas con este paquete pueden ser de geometría rectangular, cilíndrica, esférica o semiesférica, y se pueden definir con un ángulo de inclinación particular. En la Figura 10 se muestra una estructura de calor rectangular parcialmente sumergida en contacto con dos volúmenes.

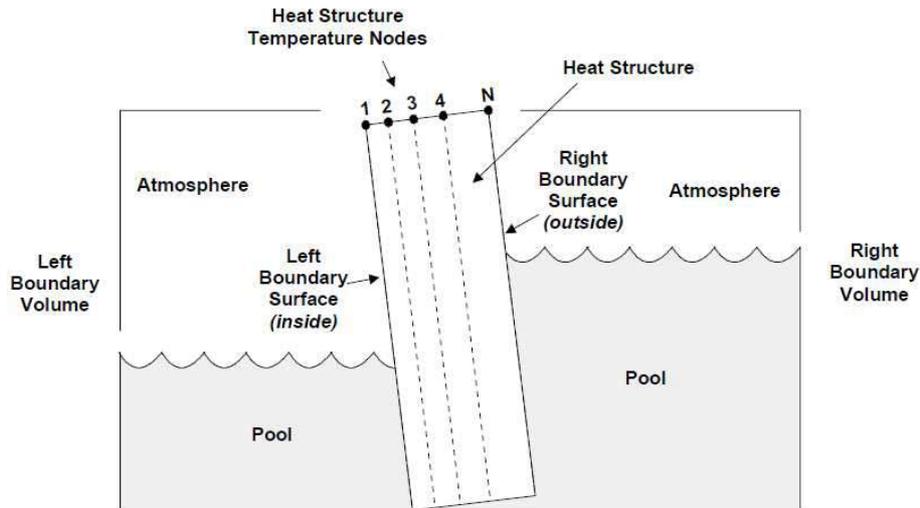


Figura 10: Estructura de calor rectangular en contacto con dos volúmenes de control. Puede apreciarse la discretización de nodos en el interior de la estructura (SNL, 2005)

Cada estructura de calor se encuentra nodalizada con N nodos internos de temperatura, según se muestra en la Figura 10. La nodalización puede ser uniforme o no-uniforme. El gap entre nodos se llama “intervalo de malla” y cada uno de ellos puede estar constituido por un material diferente. Las características térmicas de los distintos materiales se especifican a través del paquete “Material Properties”. Se puede asociar una fuente de calor interna en cada intervalo de malla que puede ser variable en el tiempo. Las condiciones de borde en las superficies de cada estructura para el cálculo de transferencia de calor, pueden implementarse en Melcor según las opciones que se detallan a continuación:

- adiabática
- convección con coeficiente de transferencia de calor calculado
- convección con coeficiente de transferencia de calor calculado y una fuente de calor superficial especificada
- convección con una función conocida del coeficiente de transferencia de calor
- temperatura de pared especificada a través de una dependencia funcional
- flujo de calor especificado por una función conocida

Las condiciones iniciales de la estructura de calor se pueden definir estableciendo la temperatura inicial de cada nodo, o bien se puede partir de estado estacionario calculado previo a la inicialización del programa.

3.5 Paquete BUR

El paquete BUR modela la combustión de gases premezclados en volúmenes de control, teniendo en cuenta efectos globales del quemado en lugar de considerar la cinética real de la reacción ni la propagación real del frente de onda de la llama. Los modelos de combustión que utiliza el paquete se basan en los modelos de deflagración del código HECTR 1.5, agregando además coeficientes de sensibilidad que pueden ser modificados por el usuario.

Las deflagraciones tienen lugar en el paquete BUR cuando las concentraciones molares de la mezcla satisfacen una expresión de la fórmula de LeChatelier.

La propagación de la combustión desde un volumen de control se considera hacia los volúmenes de control al cual se encuentra conectado. MELCOR considera la dependencia de los límites de inflamabilidad con la dirección de propagación entre volúmenes, permitiendo utilizar distintos límites de combustión para la propagación horizontal y vertical hacia arriba y abajo. El código también permite al usuario configurar el tiempo que demora el frente de onda de la llama en llegar a los flow paths desde que se inicia la combustión en un volumen. Esto permite modelar el tiempo de avance de la llama en los volúmenes.

MELCOR permite modelar combustiones no completas en las cuales no se consume todo el combustible de un volumen. Para ello, el paquete BUR calcula la completitud de cada combustión mediante correlaciones. El tiempo que dura la combustión se obtiene a partir de la longitud característica del volumen de control (input del usuario) y de la velocidad de propagación de la llama (input o correlación del código HECTR). A partir del conocimiento de la completitud y tiempo de demora de una combustión, BUR calcula en cada paso de tiempo la velocidad de la combustión.

El paquete BUR utiliza el modelo de difusión de llama para representar la combustión de hidrógeno que está ingresando a un volumen de control bajo condiciones de DCH (direct containment heating). En esas condiciones, el hidrógeno entra al volumen junto a partículas calientes que pueden encender la mezcla, por lo que varían las condiciones de combustión.

Los parámetros que el usuario puede establecer como inputs al código son los límites de ignición, detonación y completitud, y los parámetros de propagación y difusión de llama.

MELCOR no modela detonaciones. El paquete BUR solamente advierte en caso de satisfacerse la condición de detonación en un volumen de control. Fuera de esta advertencia, una mezcla en la condición de detonación recibe por el código el mismo tratamiento que una mezcla dentro de los límites de deflagración.

Otra característica a tener en cuenta respecto al modelado de combustiones de hidrógeno con MELCOR es la forma de liberar hidrógeno en un volumen. Al inyectar hidrógeno en un volumen como una fuente de masa y entalpía, el código MELCOR distribuye uniformemente la masa y la energía liberada en todo el volumen. Este efecto de distribución homogénea del hidrógeno impide considerar o modelar una combustión localizada. Suponiendo, por ejemplo, el caso de una liberación de hidrógeno en forma de jet por la rotura de una cañería y una combustión en la proximidad de esta última, el modelado de este problema con MELCOR arrojaría como resultado una acumulación progresiva del hidrógeno en todo el recinto.

Otra peculiaridad respecto al hidrógeno es que su baja densidad produce en un recinto la acumulación del mismo en la parte superior. Sin embargo, MELCOR no considera la densidad del hidrógeno, por lo que no se puede modelar la distribución preferencial del mismo dentro de un volumen.

3.6 Paquetes “Tabular Function” (TF) y “Control Function” (CF)

Los paquetes TF y CF permiten definir dependencias funcionales en el tiempo de distintas variables Melcor, para usarlas como “inputs” a lo largo del programa. Estos paquetes ofrecen flexibilidad en el manejo de datos y permiten modelar fuentes de masa y energía, y establecer relaciones funcionales entre variables.

TF permite construir una tabla que utiliza pares ordenados de datos del tipo (tiempo, variable) para representar una función temporal mediante la interpolación entre puntos.

CF permite aplicar funciones matemáticas a distintas variables y utilizar el resultado de la operación como “input” del programa. Ejemplos de funciones son sumas, productos, integrales en el tiempo, derivadas, ciclos de histéresis, etc.

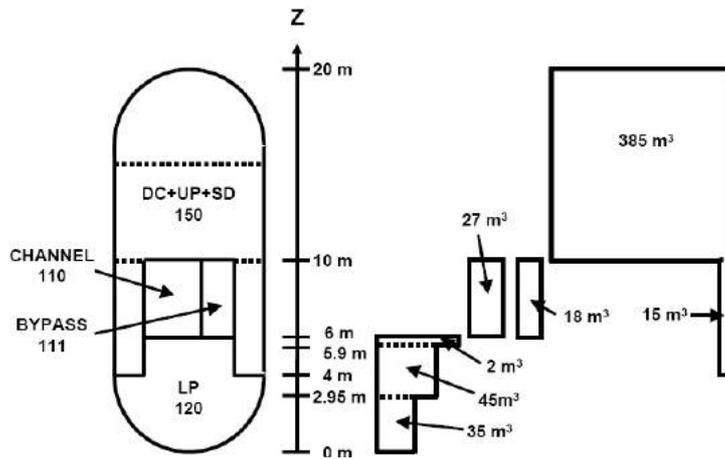


Figura 12: Volúmenes de control utilizados para modelar la respuesta termohidráulica del recipiente de presión durante el accidente (SNL, 2001)

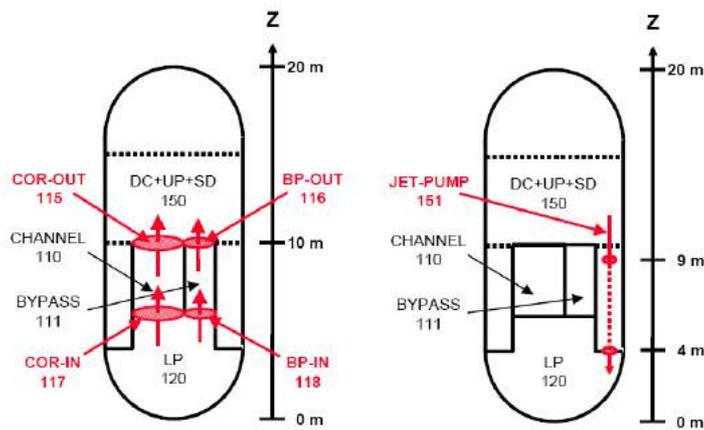


Figura 13: Flow paths utilizados para modelar la termohidráulica del recipiente de presión (SNL, 2001)

En la Figura 14 y la Figura 15 se muestran los volúmenes de control que se utilizaron para modelar la contención del ejercicio.

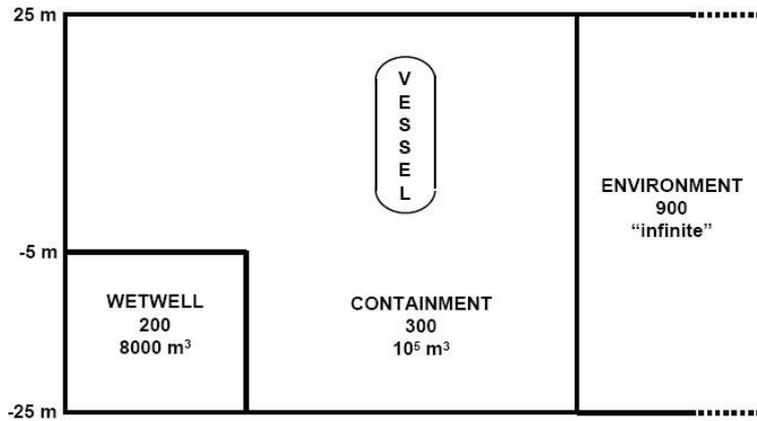


Figura 14: Volúmenes de control utilizados en el ejercicio para modelar la contención (SNL, 2001)

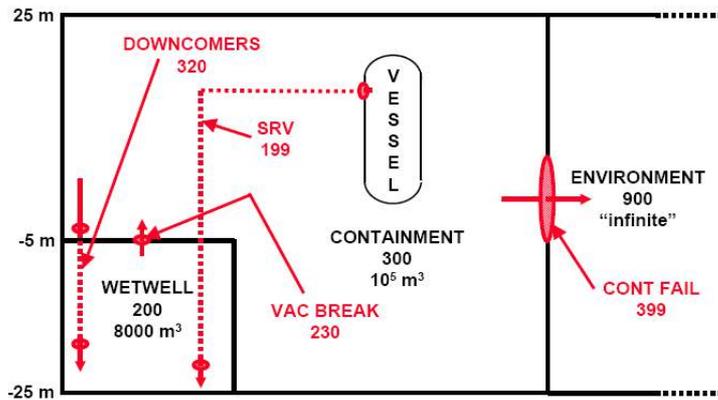


Figura 15: Flow Paths utilizados para modelar las conexiones de distintos compartimentos de la contención (SNL, 2001)

El ejercicio realizado permitió comprender la forma de especificar los inputs de los paquetes de MELCOR más relevantes para este trabajo (CVH, FL, HS y BUR), familiarizarse con la respuesta termohidráulica del accidente y predecir la evolución temporal de las principales variables involucradas en el mismo. Esta base práctica fue muy importante en el desarrollo del trabajo para entender el funcionamiento de la herramienta de cálculo utilizada.

Capítulo 5: Descripción breve de un reactor integrado

En este capítulo se introducen las características básicas del sistema primario de un reactor integrado, y se describe el diseño típico de una contención para este tipo de reactores.

5.1 Introducción

Un reactor integrado es llamado así porque el circuito de refrigeración primario se encuentra totalmente dentro del recipiente de presión, reduciendo el tamaño de roturas que puedan provocar accidentes con pérdida de refrigerante. El concepto del reactor integrado propone la refrigeración de los elementos combustibles por convección natural y un sistema primario autopresurizado, que hacen a la seguridad intrínseca del reactor, además de contar con sistemas de seguridad pasivos. Es decir, este tipo de central nuclear posee un diseño estrechamente relacionado a la seguridad del reactor.

5.2 Sistema Primario

El sistema primario está compuesto por el núcleo, generadores de vapor y domo de vapor contenidos dentro de un solo recipiente de presión (ver Figura 16). El refrigerante circula por convección natural, ingresando al núcleo desde el plenum inferior, atravesándolo y ascendiendo a través de la chimenea. Luego desciende a través de los generadores de vapor modulares y el downcomer hacia el plenum inferior. La fuerza impulsora del caudal de refrigeración es la diferencia de densidad del agua a lo largo del circuito (fuerza boyante), la cual alcanza a compensar las pérdidas de carga. El agua también actúa como moderador del núcleo. Los elementos combustibles no poseen canales, para favorecer de este modo el mezclado, por lo que aquellos que generen mayor potencia tendrán mayor flujo másico de refrigerante (ya que la fuerza boyante en dichos canales es mayor, pues es mayor la diferencia de densidades).

La autopresurización del primario es el resultado del equilibrio líquido-vapor en el domo. En la parte superior del recipiente de presión existe una gran cámara de vapor que absorbe las eventuales perturbaciones en la presión del primario. Es decir, no

existe un presurizador activo (como suele haber en muchos reactores de potencia) separado del recipiente de presión. De esta forma, la presión se autoregula en torno a un valor de referencia, y la temperatura del agua a la salida del núcleo corresponde a la de ebullición para esa presión.

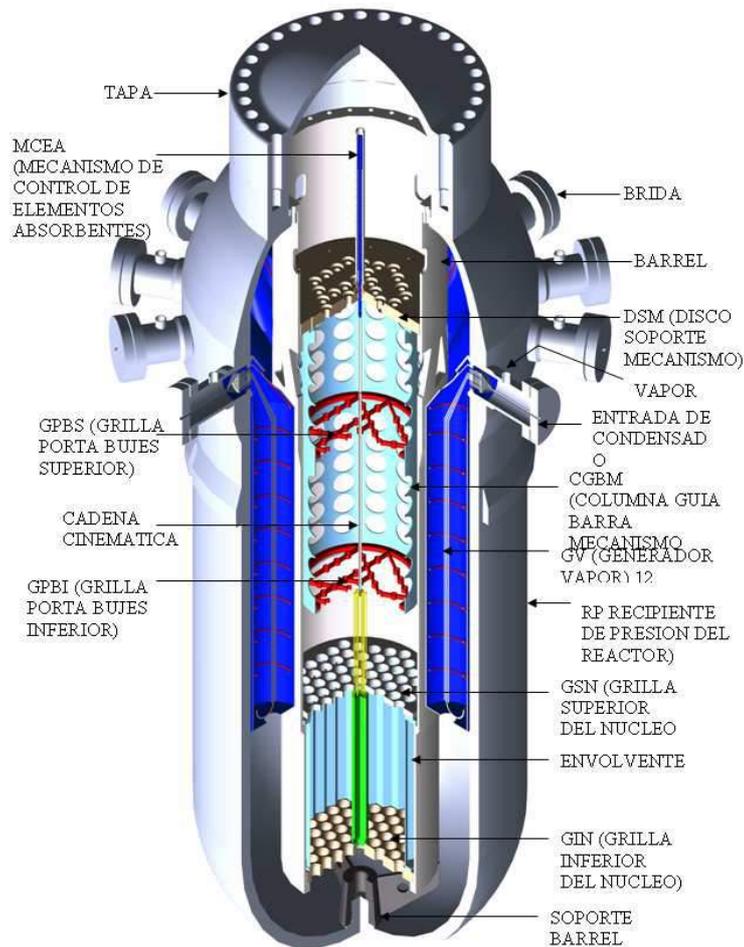


Figura 16: Sistema primario de un reactor integrado (Benielli, 2010)

5.3 Contención del reactor integrado

La contención primaria de un reactor integrado tipo PWR es la estructura principal de la central que actúa en el esquema de defensa en profundidad como barrera después de la vaina del combustible y la envuelta de presión del sistema primario. Tiene la función de seguridad de controlar la liberación de material radiactivo o contener las fugas del mismo.

De acuerdo a la reglamentación nuclear vigente en Argentina, la contención primaria debe ser capaz de asegurar que los materiales radioactivos estén lo suficientemente confinados en cualquier modo de operación o evento de la planta de manera de satisfacer con los límites de emisiones radiológicas relativos a accidentes en centrales nucleares que se citan en la norma AR 3.1.3.

La contención clásica de un reactor integrado PWR tiene las características típicas de aquellas utilizadas en los reactores BWR, con una pileta de supresión para absorber el calor sensible y latente resultante de un LOCA.

El diseño incluye:

- La estructura de la contención, el recinto seco, la pileta de supresión, sus aberturas de accesos, penetraciones y aperturas.
- Válvulas, tuberías, sistemas cerrados y otros componentes utilizados para aislar en forma efectiva la atmósfera de la contención del medio ambiente.
- Aquellos sistemas o porciones de sistemas que por su función extiendan los límites de estructura de la contención y provean una efectiva aislación.

La contención es una estructura cilíndrica de hormigón armado con techo y fondo planos, con un recubrimiento o "lining" interior de acero inoxidable. Se encuentra ubicada dentro de un edificio también de hormigón denominado módulo nuclear.

Está dividida en dos zonas principales denominadas recinto seco y recinto húmedo. El recinto húmedo está parcialmente lleno con el agua que conforma la pileta de supresión de presión (PS). El recinto seco se divide en el Recinto Central (RC) donde se aloja el RPR, Recinto Superior (RS) y Recinto Inferior (RI). Este último contiene los componentes de los sistemas auxiliares del reactor internos a la contención.

En el nivel superior se encuentra la Pileta Sumidero de Calor (PSC) y el Recinto Superior (RS). Los tabiques que dividen los recintos además de proporcionar resistencia estructural proveen la separación física entre redundancias de los sistemas de seguridad instalados en este nivel. El acceso a este nivel es a través de un sistema de puertas dobles con enclavamiento (SAS). El cierre de la contención se hace por medio de una tapa metálica (tapa del recinto central) ubicada en la parte inferior de este nivel.

Por debajo del Recinto Superior y formando parte del RC se encuentra un recinto cilíndrico periférico donde se hallan instaladas las cañerías del circuito secundario,

formando un anillo de distribución y las cañerías y válvulas de los sistemas auxiliares que llegan hasta el recipiente de presión del reactor. Este recinto se separa del sector donde se ubica en RPR por medio de un tabique cilíndrico que además de cumplir funciones estructurales actúa como blindaje radiológico. El Recinto Central llega hasta el fondo de la contención. En este nivel también se encuentra un sistema de puertas dobles con enclavamiento (SAS) y se puede acceder desde el Recinto Superior por un vano ubicado en su techo. En el piso del recinto periférico serán colocados los tubos de descarga a la pileta de supresión de presión, los tubos para romper vacío, una montante para conductos y cañerías que deben llegar hasta el Recinto Inferior y un vano de acceso a la pileta de supresión normalmente cerrado.

Del lado externo de la contención se encuentra el canal de transferencia a través del cual se realiza el traslado de los elementos combustibles e internos del recipiente del reactor durante las maniobras de recambio de elementos combustibles y mantenimiento. El recinto formado por la salida hacia el canal de transferencia y la zona de acceso a la tapa del Recinto Central está cerrado con blindajes removibles.

Para mantener las condiciones de calidad y temperatura del agua de la pileta de supresión de presión, tanto en operación normal como para la remoción de calor en post-accidente se cuenta con el sistema de purificación y refrigeración.

Capítulo 7: Simulaciones de secuencias accidentales y desarrollo del problema

En este capítulo se presentan las condiciones y los resultados de la simulación de una secuencia accidental base de pérdida de refrigerante en el recinto central debido a una rotura de 12,7 mm de diámetro (LOCA 0,5"). A partir de esta secuencia base, se realiza un análisis paramétrico de los efectos que tienen la tasa de liberación de hidrógeno, el tamaño y posición de la rotura y la nodalización del recinto central en el progreso global del accidente, en la acumulación de hidrógeno en la contención y su posterior combustión.

7.1 Postulados y condiciones de las simulaciones

Se representó el accidente de pérdida de refrigerante por una rotura con información proveniente de un modelo MELCOR del primario provisto por el grupo de Seguridad Nuclear. El caudal másico y la entalpía del vapor que atraviesa la rotura en el accidente se obtuvieron del modelo mencionado para confeccionar la tabla correspondiente (TF) utilizada en el programa. La tasa de generación de hidrógeno asume distintos valores en un accidente conforme el mismo progresa. Para analizar las consecuencias en la contención de la tasa de liberación del hidrógeno, se simularon distintas secuencias accidentales de LOCA considerando tasas constantes arbitrarias de liberación de hidrógeno. En todas las simulaciones realizadas se asumió la liberación de 60 kg de hidrógeno a la contención, siendo esta masa equivalente a la oxidación de 1357 kg de circonio. El tiempo de aparición del hidrógeno en la contención se estimó como el tiempo que demora en descubrirse la parte superior del núcleo en el accidente. Se eligió un tiempo de corrida de 24 horas para realizar las simulaciones.

7.2 Descripción de la Secuencia Accidental Base (SAB) - LOCA 0,5" en el recinto central con una tasa de liberación de hidrógeno de 5 kg/h

La secuencia accidental tomada como base para el análisis es una pérdida de refrigerante (LOCA) originada en el recinto central (RC) por una rotura de 12,7 mm de diámetro en el sistema primario, simulada bajo las condiciones explicadas más arriba.

Se asumió además una tasa de liberación de hidrógeno de 5 kg/h, con una liberación total de 60 kg de hidrógeno.

En la Figura 21 se muestra la evolución temporal de las fracciones molares en el recinto central durante el accidente. La atmósfera del recinto central posee aire al inicio de la simulación cuando comienza la pérdida del refrigerante, por lo cual la masa de vapor en el recinto central de la contención crece bruscamente. El alto caudal de vapor que se inyecta en el recinto central provoca que el aire inicial del recinto se transporte hacia los volúmenes de control adyacentes. Esta situación al comienzo del accidente produce el salto brusco en la fracción molar de vapor que se observa en la Figura 21, así como la disminución de la fracción molar del oxígeno en el volumen. Pasadas 7,2 h del inicio del accidente, el núcleo comenzaría a descubrirse de acuerdo a los cálculos realizados con el modelo MELCOR preexistente en el grupo de Seguridad Nuclear para el sistema primario de este reactor. Por consiguiente, es en este momento cuando se comienza a inyectar el hidrógeno en el recinto central en la simulación base, lo cual produce en consecuencia que la fracción molar de hidrógeno experimente un aumento, y que la fracción molar de vapor de agua comience a descender. La presión en el recinto central crece conforme se inyecta el vapor según se muestra en la Figura 22. El hidrógeno y el vapor inyectados son transportados desde el recinto central al resto de los volúmenes a través de los Flow Paths debido a las diferencias de presión.

En la pileta de supresión una gran fracción del vapor de agua que ingresa se condensa, mientras que el hidrógeno pasa a formar parte de la atmósfera del volumen junto con el aire que había sido previamente desplazado desde el recinto central. De esta forma, al inicio del accidente, la fracción molar de oxígeno en la pileta de supresión crece hasta alrededor del 20 % y la del vapor desciende hasta aproximadamente el 5 % según se muestra en la Figura 23. La continua inyección de hidrógeno y vapor en el volumen de la pileta provoca el aumento lineal de la fracción molar de hidrógeno y el descenso lineal de la de oxígeno. A las 12,5 h aproximadamente se cumple la condición de combustión en el recinto, puesto que el hidrógeno llega al 10 %, el vapor se encuentra por debajo del 55 % y el oxígeno se ubica por encima del 5 %. Se produce, por lo tanto, la primera deflagración en la pileta de supresión, consumiendo hidrógeno y oxígeno y generando vapor en la atmósfera. La presión en la pileta de supresión crece bruscamente durante la deflagración según se puede ver en el pico de presión de la Figura 24.

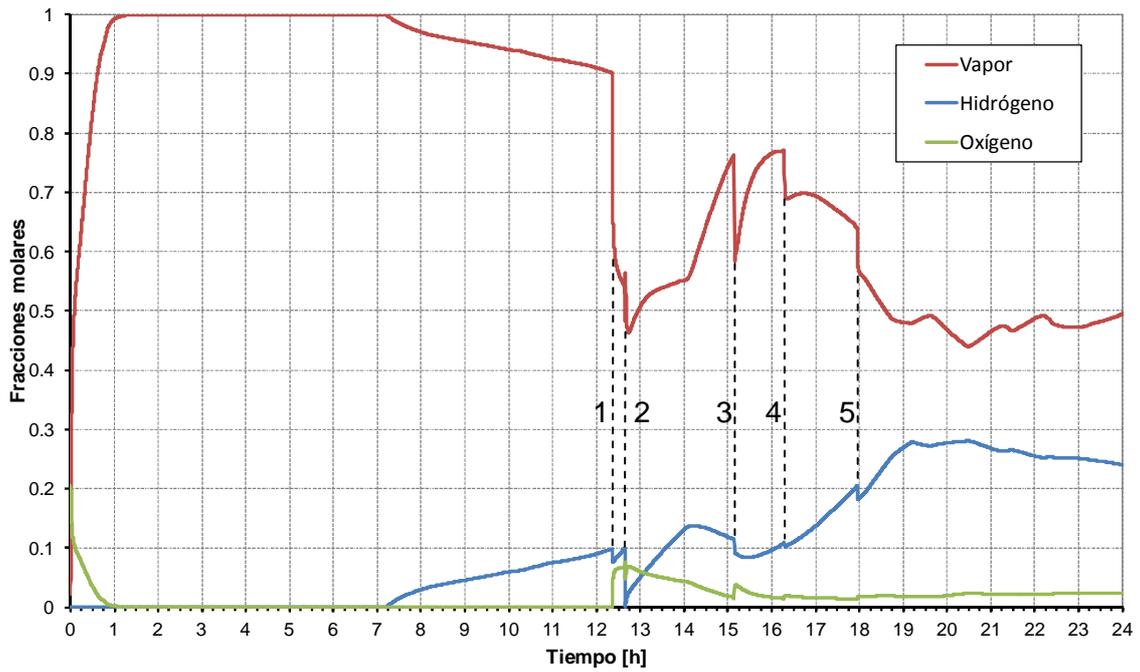


Figura 21: Fracciones molares en el RC durante la SAB. La línea punteada 2 muestra la deflagración en RC. Las líneas 1, 3, 4, 5 y 6 son deflagraciones en recintos aledaños.

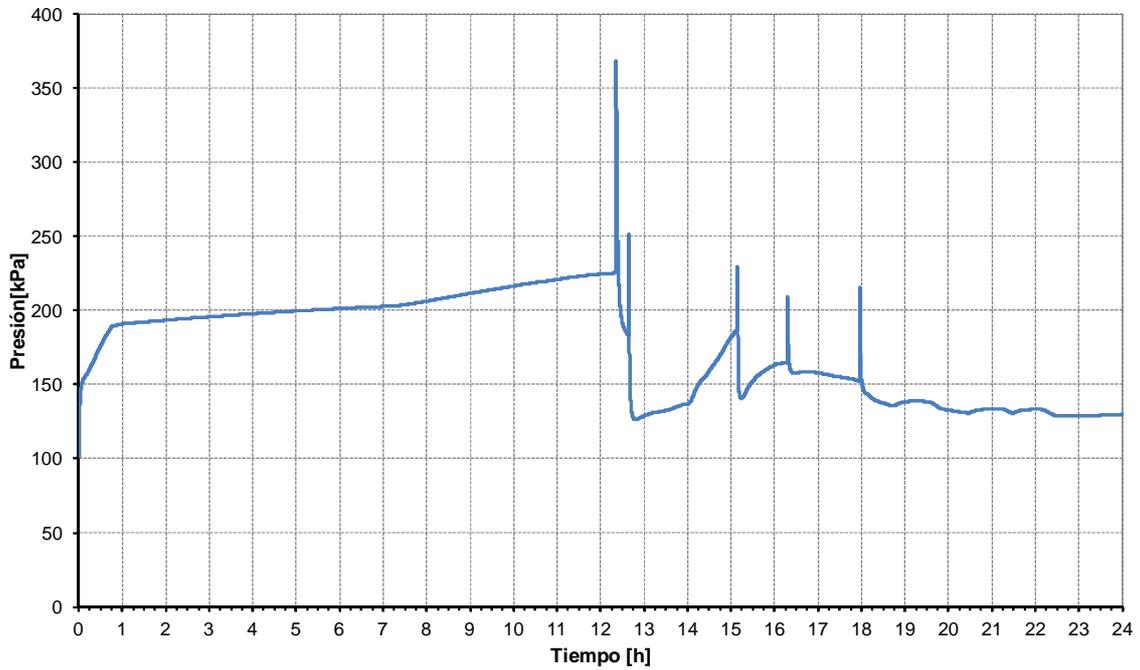


Figura 22: Evolución temporal de la presión en el RC en la secuencia accidental base

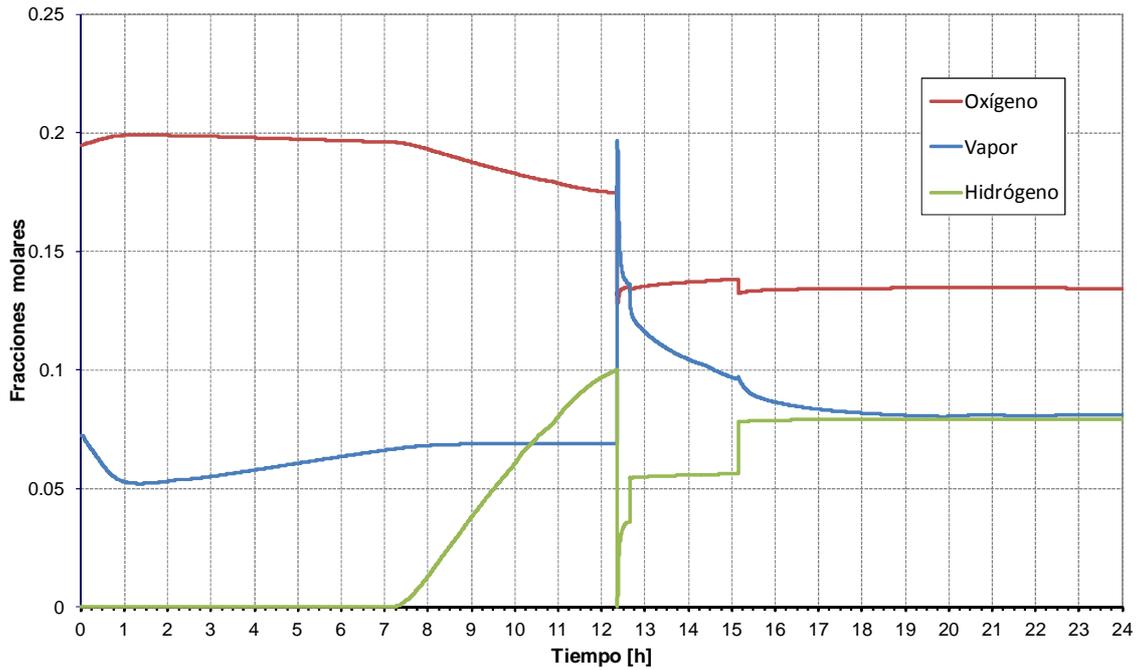


Figura 23: Fracciones molares en la PS. Accidente LOCA 0,5'' - Liberación de hidrógeno a 5 kg/h en el RC

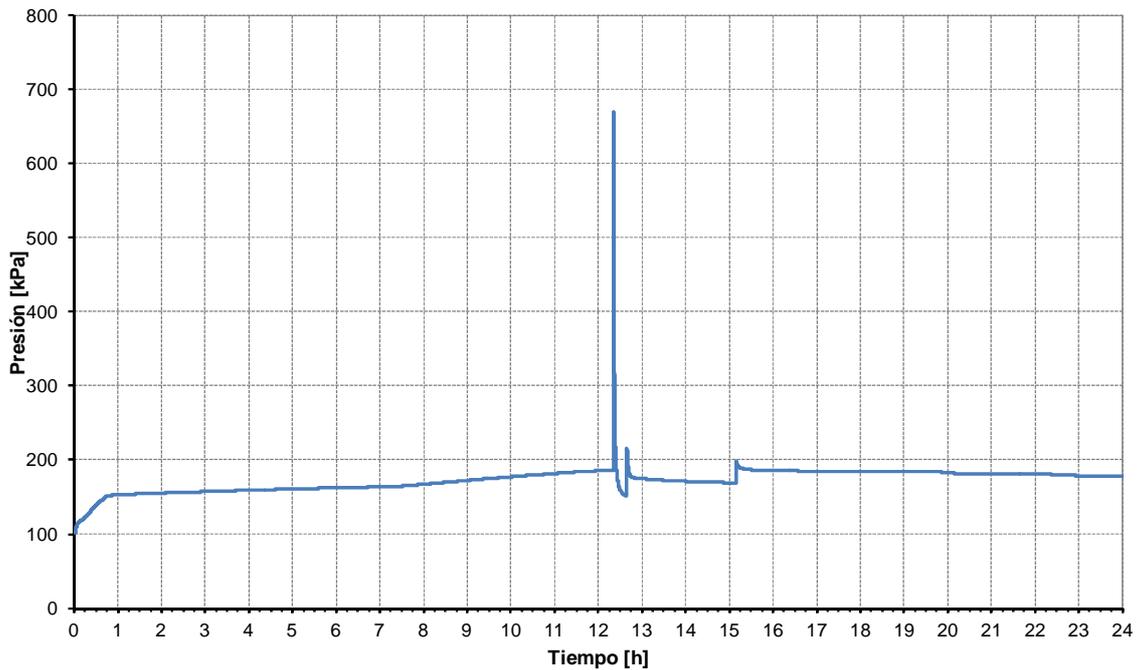


Figura 24: Evolución temporal de la presión en la PS. LOCA 0,5'' - Liberación de hidrógeno a 5 kg/h en el RC

El pico de presión de la piletta empuja una parte de los gases presentes (nitrógeno, oxígeno, vapor de agua y muy poco hidrógeno sin reaccionar) hacia el recinto central a través de la válvula FL800. Al mismo tiempo, el aumento brusco de la presión produce

el vaciamiento parcial del agua de la piletta a través de FL900 debido a que la válvula FL800 no es capaz de despresurizar el recinto de la PS tan rápido. En la Figura 25 se muestra que la masa de agua de la piletta se incrementa hasta un 3,5% desde el inicio del accidente por la condensación del vapor inyectado y cae aproximadamente un 15% por la deflagración.

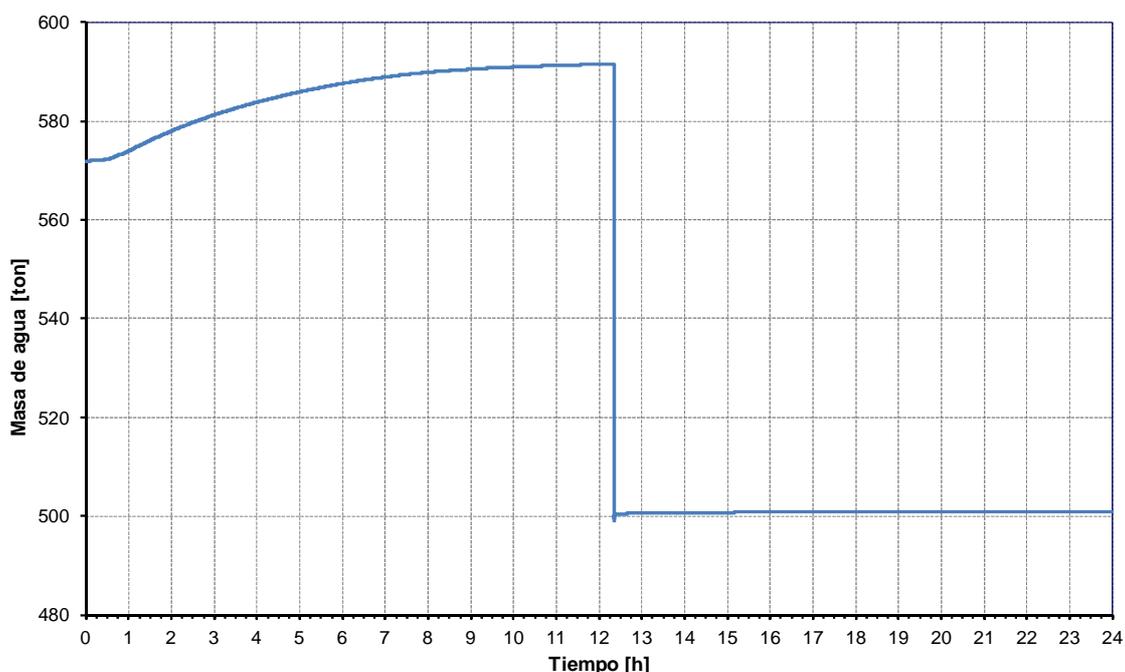


Figura 25: Vaciamiento parcial de la piletta de supresión debido a la deflagración producida en su atmósfera. LOCA 0,5'' - Liberación de 5 kg/h de hidrógeno en el RC

El ingreso de oxígeno a través del FL800 aumenta la fracción molar de oxígeno en el recinto central y disminuye las fracciones de vapor e hidrógeno (ver línea punteada 1 de la Figura 21). Como consecuencia de esto, la fracción de vapor en el RC cae por debajo del 55 % y la fracción de oxígeno supera el 5 %. Se cumple la condición de combustión en el RC y se produce la deflagración (ver línea punteada 2 de la Figura 21). El efecto sobre el recinto central de las deflagraciones en los recintos aledaños es siempre el mismo durante el accidente LOCA, a saber: descenso brusco de la fracción de vapor, aumento de la fracción de oxígeno y leve descenso de la fracción de hidrógeno. Es decir, parte del aire que inicialmente abandonó el recinto central debido a la inyección del vapor desde el RPR, retorna al mismo violentamente cuando se produce la combustión en otros recintos.

En los puntos 1, 2, 3 y 4 de la Figura 26 pueden notarse las deflagraciones que se producen en los recintos secos. En el punto 1 la combustión en el RC impulsa una

masa con alta fracción de hidrógeno hacia los recintos RS y RI, por lo cual alcanzan la condición de combustión. En el punto 2 se produce una deflagración en RI y la onda de presión se propaga al RC. Como el RC tiene una fracción de hidrógeno más alta, la masa que se impulsa hacia el RS por la onda de presión induce en este último la condición de combustión y tiene lugar una deflagración. En el punto 3 se produce una deflagración en RI y en el punto 4 una deflagración en RS. Nótese que en este último, la deflagración en RS induce un incremento en la fracción molar de hidrógeno en el RI, debido a la onda de presión y a la fracción de hidrógeno alta en RC. Por lo tanto, una combustión durante el accidente en el recinto superior (resp. inferior) tiende a aproximar la condición de combustión al recinto inferior (resp. superior).

El efecto de la combustión en RC, RI o RS sobre la pileta de supresión depende de la intensidad de la combustión. Esto se debe a que la única forma de inyectar masa en la pileta de supresión se logra si la presión en RC supera a la presión de la columna de agua de la pileta. En esta simulación, las últimas deflagraciones en RS y en RI no inyectaron masa en la PS, porque la suma de la presión de la atmósfera de la PS y de la presión de la columna de agua era de 3,25 atm y los picos de presión generados no superaron ese valor.

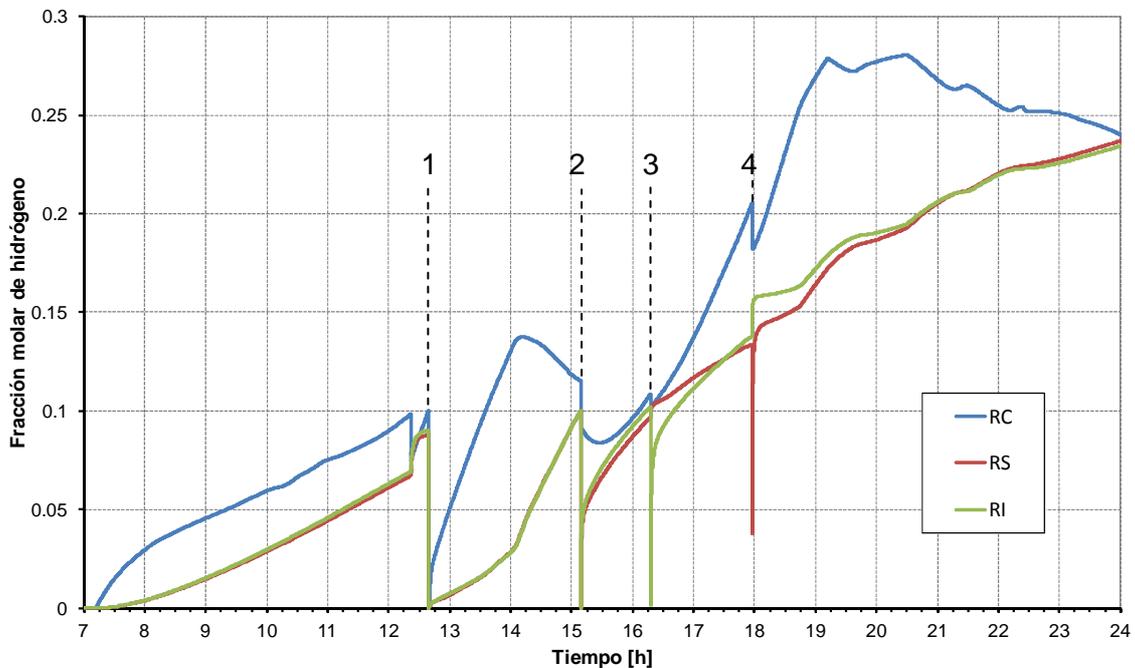


Figura 26: Fracción molar de hidrógeno en RC, RS y RI. Pueden verse las deflagraciones en los puntos 1, 2, 3 y 4. LOCA 0,5'' - Liberación de 5 kg/h de hidrógeno en el RC

7.3 Efecto del tamaño de la rotura en el desarrollo del accidente

Para evaluar la sensibilidad de la evolución del accidente con el parámetro del tamaño de rotura del circuito primario se simuló una secuencia accidental de pérdida de refrigerante en el recinto central de la contención con una rotura de 50,8 mm de diámetro (LOCA 2"). El caudal másico y la entalpía del vapor que atraviesa la rotura en el accidente se obtuvieron a partir de resultados preexistentes de una simulación con el código RELAP del primario para confeccionar la tabla correspondiente (TF) utilizada en el código MELCOR.

En la Tabla 4 se muestra información importante de las simulaciones para comparar la secuencia accidental base con el accidente LOCA 2" en el recinto central a una tasa de liberación de hidrógeno de 5 kg/h.

| LOCA 0,5" - 5 kg/hora de Hidrógeno | Recinto central | PS | RS | RI |
|---|-----------------|-----|------|------|
| Cantidad de deflagraciones | 1 | 1 | 4 | 3 |
| Tiempo a 1ª Deflagración: 5,2 h | | | | |
| Valor máximo de presión (atm) | 3,68 | 6,7 | 3,68 | 3,68 |

| LOCA 2" - 5 kg/hora de Hidrógeno | Recinto central | PS | RS | RI |
|---|-----------------|-----|------|------|
| Cantidad de deflagraciones | 0 | 2 | 2 | 3 |
| Tiempo a 1ª Deflagración: 4,6 h | | | | |
| Valor máximo de presión (atm) | 4,24 | 7,1 | 4,24 | 4,24 |

Tabla 4: Datos de simulación relevantes en la comparación LOCA 0,5" - LOCA 2". El valor máximo de presión en RI y RS es aproximadamente igual al de RC.

Como se aprecia en la Tabla 4, la cantidad total de deflagraciones en el LOCA 0,5" es mayor a la del LOCA 2" y los valores máximos de presión en RC y PS son algo menores.

En el caso del LOCA 2", el mayor caudal de vapor que se libera en el RC provoca que al inicio del accidente la presión en ese recinto aumente con mayor rapidez. Esto produce que el aire desplazado del RC comience a ingresar antes a la PS. Por lo tanto, la fracción de aire del RC que se acumula en la PS es mayor al tener una rotura más grande. Esto explica que la primera deflagración sea más intensa en la PS y que se produzca aproximadamente 30 minutos antes. Bajo el mismo razonamiento, la fracción de aire del RC que se transporta a RS y RI disminuye al aumentar la rotura. Esto se suma a la mayor dilución del hidrógeno en los recintos secos y permite

explicar que las deflagraciones en RS y RI sean menos intensas. Por lo tanto, cuando en RS y RI se produce una combustión, la cantidad de aire que retorna al RC es menor. Como el RC también tiene una dilución muy importante del hidrógeno, no alcanza la condición de combustión para la rotura de 2". Este resultado parecería no esperado o al menos no intuitivo a priori. Sin embargo, la alta dilución del hidrógeno y el transporte inicial de aire desde el recinto central alejan a este último de la condición de combustión.

A efectos comparativos, se realizaron también simulaciones con una rotura de 2" y distintas tasas de liberación de hidrógeno en el RC. Para tasas de hidrógeno mayores que 15 kg/h, se detectó una combustión en RC debido a la propagación de la llama proveniente de la PS a través de la válvula FL800 agregada al modelo inicial. Se sugiere, por lo tanto, evaluar la posibilidad de colocar para FL800 una válvula o dispositivo antirretroceso de llama (flame arrestor valve) (Grossel 2010)

7.4 Efecto de la posición de la rotura dentro de la contención

La secuencia accidental base se centró en el análisis de la pérdida de refrigerante en el recinto central. Este punto de partida no es arbitrario si se considera que el recinto mencionado es, intuitivamente, el más comprometido en cuanto a la rotura de alguna cañería en la contención del reactor integrado. Además, en este recinto se ubica la mayor cantidad de cañerías del circuito primario. No obstante, una visión más amplia del problema sugiere analizar el desarrollo y progreso del accidente considerando la posibilidad de que la pérdida se produzca en los recintos RS y RI. Es decir, se desea agregar el lugar geométrico de la rotura como parámetro del modelo y analizar el avance del accidente para idéntica tasa de liberación de vapor e hidrógeno de la secuencia base.

En la Tabla 5 se muestran la cantidad de deflagraciones por recinto y el pico de presión para simulaciones de un accidente LOCA 0,5" en los distintos recintos de la contención.

| CASO A. LOCA 0,5" en Recinto Central 5 kg/hora de Hidrógeno | Recinto central | SP | RS | RI |
|--|-----------------|-----|------|------|
| Cantidad de deflagraciones | 1 | 1 | 4 | 3 |
| Tiempo a 1º Deflagración: 5,2 h | | | | |
| Valor máximo de presión (atm) | 3,68 | 6,7 | 3,68 | 3,68 |

| CASO B. LOCA 0,5" en Recinto Inferior 5 kg/hora de Hidrógeno | Recinto central | SP | RS | RI |
|---|-----------------|------|------|------|
| Cantidad de deflagraciones | 0 | 1 | 4 | 0 |
| Tiempo a 1ª Deflagración: 7,69 h | | | | |
| Valor máximo de presión (atm) | 5,05 | 8,07 | 5,05 | 5,05 |

| CASO C. LOCA 0,5" en Recinto Superior 5 kg/hora de Hidrógeno | Recinto central | SP | RS | RI |
|---|-----------------|------|------|------|
| Cantidad de deflagraciones | 1 | 1 | 0 | 2 |
| Tiempo a 1ª Deflagración: 8,03 h | | | | |
| Valor máximo de presión (atm) | 5,14 | 8,73 | 5,14 | 5,14 |

Tabla 5: Datos de simulación relevantes en la parametrización de la posición de la rotura. El valor máximo de presión en RI y RS es aproximadamente igual al de RC.

En la Figura 27 se muestra la variación de la masa de oxígeno de los volúmenes para el caso A y en la Figura 28 lo propio para el caso C. Del análisis de estos gráficos se puede notar que en el caso A la pérdida de refrigerante en el RC produce un desplazamiento hacia los otros recintos de una masa de oxígeno numéricamente igual a la masa inicial del RC. En el caso C, en cambio, la masa total de oxígeno desplazada es igual a la suma de la masa inicial del RC y el RS. Esto es lógico porque estos dos recintos se encuentran en serie para el pasaje del caudal hasta llegar a PS o RI. Al existir más masa de oxígeno en PS y RI antes de producirse la combustión de los recintos, el pico de presión es más significativo, según se aprecia en la Tabla 5. El caso B es intermedio a los otros dos en lo que al pico de presión se refiere porque el recinto RI, donde tiene lugar la pérdida, es más chico que el recinto RS del caso C.

Según se puede ver en la Tabla 5, no se puede establecer una relación entre la cantidad total de deflagraciones y la posición de la rotura en el accidente. No obstante, se debe remarcar que el recinto en el cual se produce la rotura es menos propenso a sufrir una combustión porque la fracción molar de oxígeno cae bruscamente al inicio del accidente.

Otro caso a analizar en cuanto a la posición de la rotura sería considerar la falla de la válvula de alivio del recipiente de presión (SRV). Esta secuencia implica la liberación de vapor e hidrógeno directamente en la pileta supresora a través de un flow path con su salida sumergida en el agua. En esta sección no se realizaron estas simulaciones, pero se recomiendan para un futuro trabajo.

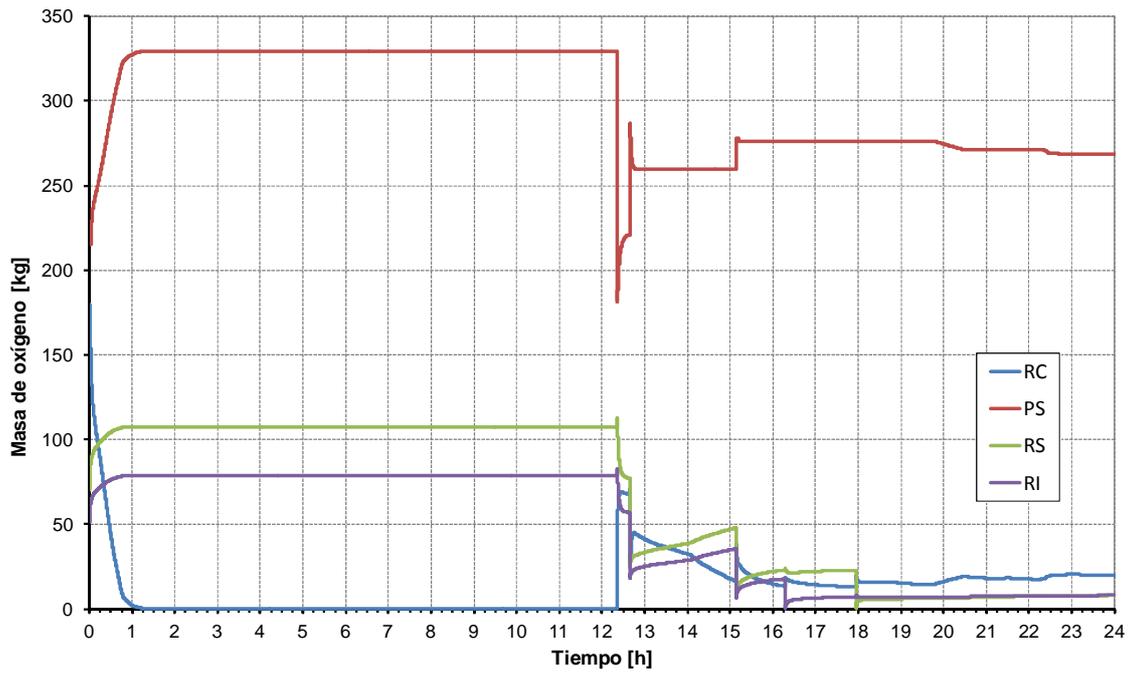


Figura 27: Masa de oxígeno en los recintos para la secuencia accidental base

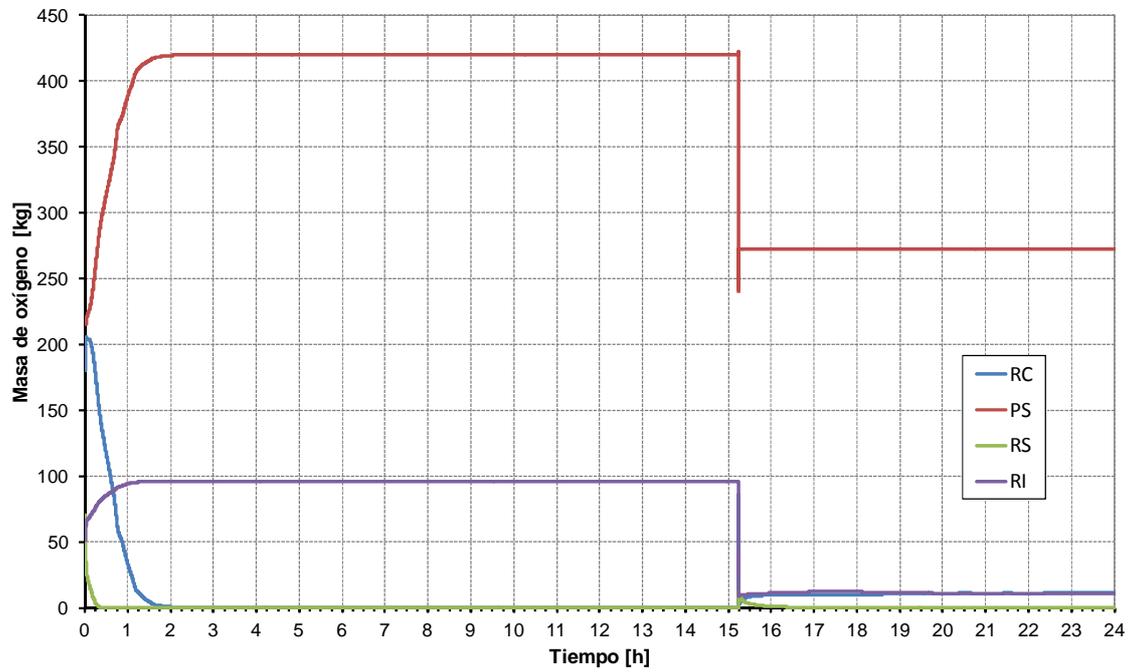


Figura 28: Masa de oxígeno en los recintos para LOCA 0,5% y 5 kg/h de hidrógeno en RS

7.5 Efecto de la tasa de generación de hidrógeno

En la Tabla 6 se muestran los resultados de las simulaciones con distintas tasas de liberación de hidrógeno al recinto central (5 kg/h, 15 kg/h, 30 kg/h y 60 kg/h) para un LOCA por una rotura de 12,7 mm de diámetro (LOCA 0,5”), utilizando en todas las simulaciones el mismo caudal de vapor. En los casos de una tasa de hidrógeno de 15 kg/h, 30 kg/h y 60 kg/h, no se pueden notar diferencias significativas en el pico de presión ni en la cantidad de deflagraciones en los recintos.

| CASO A. LOCA 0,5” en Recinto Central 5 kg/hora de Hidrógeno | Recinto central | SP | RS | RI |
|--|-----------------|-----|------|------|
| Cantidad de deflagraciones | 1 | 1 | 4 | 3 |
| Valor máximo de presión (atm) | 3,68 | 6,7 | 3,68 | 3,68 |

| CASO B´. LOCA 0,5” en Recinto Central 15 kg/hora de Hidrógeno | Recinto central | SP | RS | RI |
|--|-----------------|------|------|------|
| Cantidad de deflagraciones | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Valor máximo de presión (atm) | 5,46 | 6,69 | 5,46 | 5,46 |

| CASO C´. LOCA 0,5” en Recinto Central 30 kg/hora de Hidrógeno | Recinto central | SP | RS | RI |
|--|-----------------|------|-----|-----|
| Cantidad de deflagraciones | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Valor máximo de presión (atm) | 5,8 | 6,68 | 5,8 | 5,8 |

| CASO D´. LOCA 0,5” en Recinto Central 60 kg/hora de Hidrógeno | Recinto central | SP | RS | RI |
|--|-----------------|------|-----|-----|
| Cantidad de deflagraciones | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Valor máximo de presión (atm) | 5,8 | 6,68 | 5,8 | 5,8 |

Tabla 6: Datos de simulación relevantes para la parametrización de la tasa de liberación de hidrógeno. El valor máximo de presión en RI y RS es aproximadamente igual al de RC.

En la Figura 29 se muestra un gráfico del tiempo a la primera deflagración en función de la tasa de liberación de hidrógeno. Se realizó un ajuste para caracterizar el comportamiento de la contención en función de la tasa de liberación, obteniéndose un resultado hiperbólico con un error del orden de 5%:

$$t_{1^{\circ}DEF} = \frac{A}{T_{lib}^B} \quad , \quad (14)$$

donde $t_{1^{\circ}DEF}$ es el tiempo a la primera deflagración en s, T_{lib} es la tasa de liberación de hidrógeno en kg/h, y los parámetros de ajuste son $A= 23,5\pm 1,29$ y $B= 0,95\pm 0,03$ para el caso mencionado. Puede decirse que el tiempo de la primera deflagración es casi inversamente proporcional a la tasa de hidrógeno inyectada.

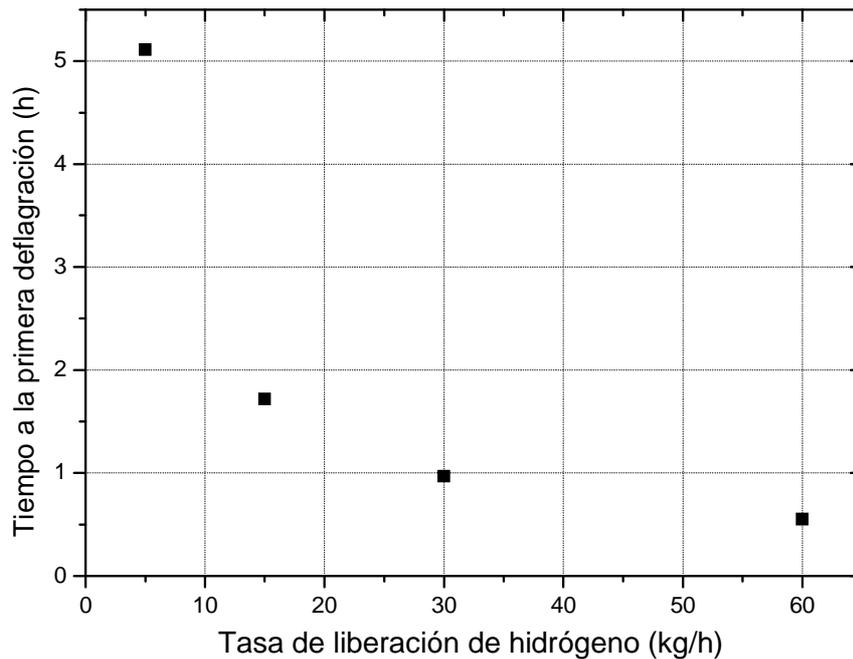


Figura 29: Relación entre la tasa de liberación de hidrógeno (kg/h) y el tiempo a la primera deflagración (s) para un accidente LOCA 0,5'' en RC

En la Figura 30 se muestra el tiempo normalizado a la primera deflagración en función de la tasa de hidrógeno para diferentes localizaciones de la rotura en la contención. Para cada posición, la normalización se realizó a fines de coincidir el tiempo a la primera deflagración para la tasa de 5 kg/h con el tiempo a la primera deflagración de la secuencia accidental base, que en la Figura 30 tiene valor unitario. Puede concluirse de este gráfico que el comportamiento aproximadamente hiperbólico de la contención en función de la tasa de liberación de hidrógeno es similar y no depende de la localización de la pérdida.

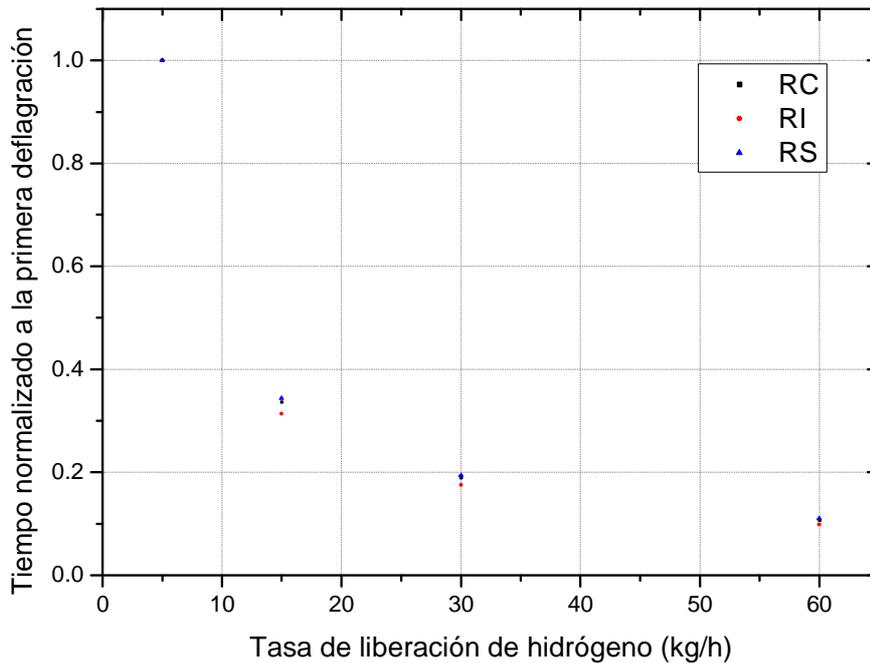


Figura 30: Tiempo a la primera deflagración (h) vs. tasa de hidrógeno (kg/h) normalizado con la secuencia accidental base.

7.6 Efecto de la nodalización del recinto central

En la Tabla 1 se muestra la configuración de los volúmenes de control del modelo base de la contención. Se puede notar que existen dos volúmenes de control muy grandes en el modelo, a saber: RC de 702,2 m³ y PS con una atmósfera de 882,5 m³.

De acuerdo a las ecuaciones del balance de masa y energía que utiliza el código MELCOR para los volúmenes de control (SNL, 2005), la masa y energía de cada especie se distribuye uniformemente en el interior de cada volumen. Para algún problema termohidráulico determinado, este tratamiento puede significar un apartamiento importante y apreciable de la respuesta del modelo respecto a la solución real. Por ejemplo, se torna imposible modelar la convección natural en un recinto utilizando un solo volumen de control para representarlo.

En el modelo base de la contención propuesto, existe la posibilidad de que la representación del RC y PS con un solo volumen de control no permitan detectar efectos espaciales relevantes en lo que respecta a la acumulación y distribución del hidrógeno. Para soslayar resultados incoherentes con la realidad y evitar conclusiones

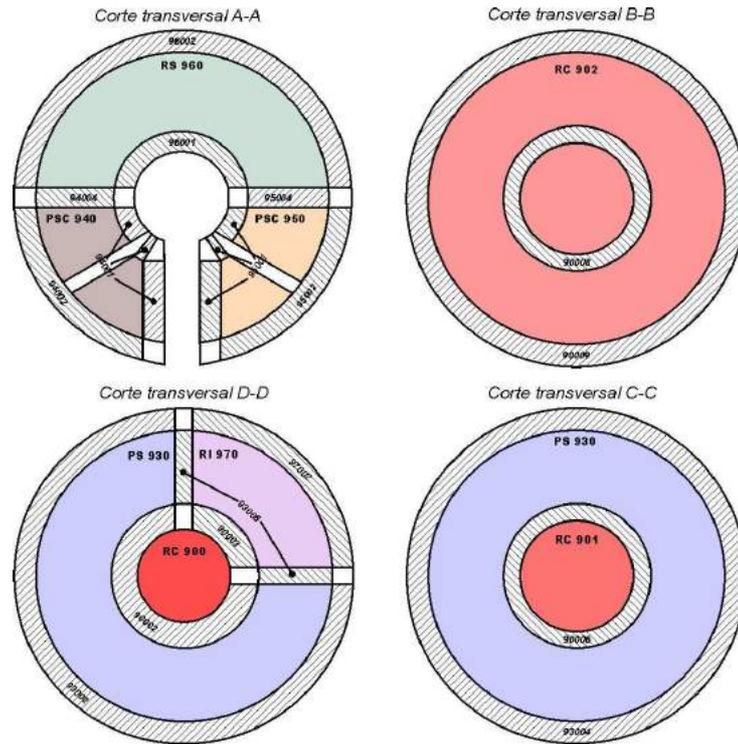


Figura 32: Corte transversal del modelo 1D de la contención

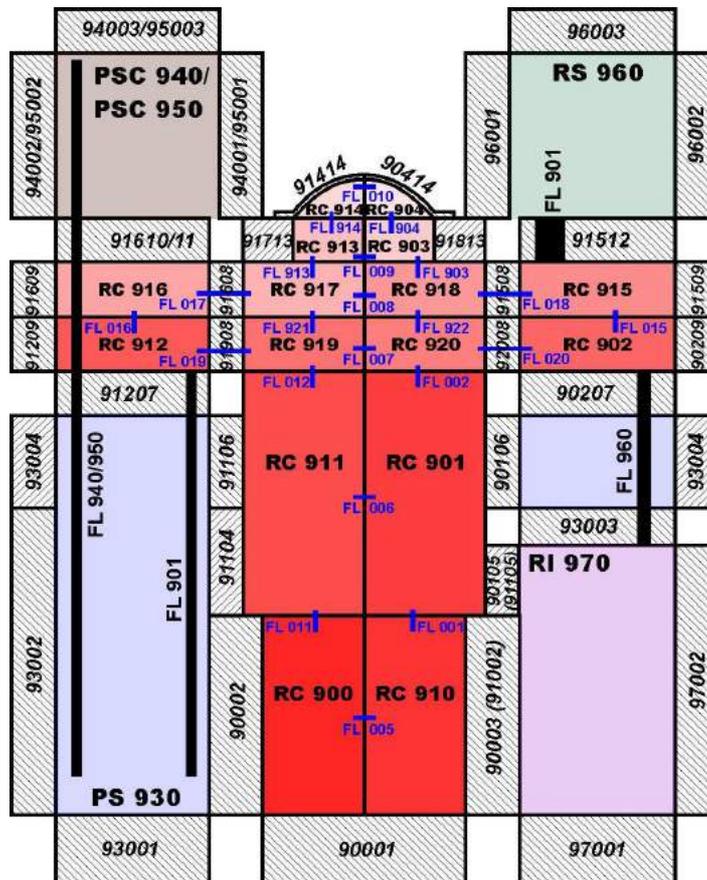


Figura 33: Corte longitudinal del modelo 2D de la contención

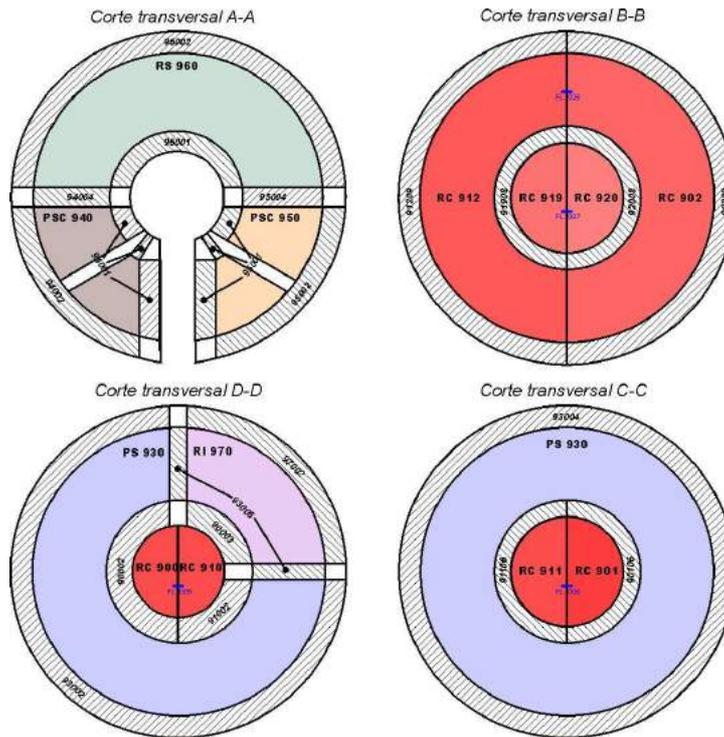


Figura 34: Corte transversal del modelo 2D de la contención

Los volúmenes de control propuestos para nodalizar el recinto central se conectan entre sí mediante Flow Paths. Las estructuras de calor comunes a dos volúmenes se dividieron en dos para representar el intercambio de calor con ambos.

7.6.1 Resultados del modelo 1D de nodalización

Para detectar y visualizar las diferencias de este modelo con el modelo base, se estudió el modelo 1D para formas distintas de localización de la fuente dentro del RC:

- Liberación del caudal de LOCA 0,5" en todo el RC de forma homogénea (caso **A**)
- Liberación del caudal de LOCA 0,5" en el volumen de control RC901, modelando de esta forma la inyección en un volumen que contiene parte del recipiente de presión del reactor (caso **B**)

El tiempo de corrida del modelo 1D, así como los restantes parámetros del programa, permanecieron inalterados para poder efectuar el estudio paramétrico.

En la Figura 35 y en la Figura 36 se muestra la evolución de la presión en RC y en PS para los casos A y B, respectivamente.

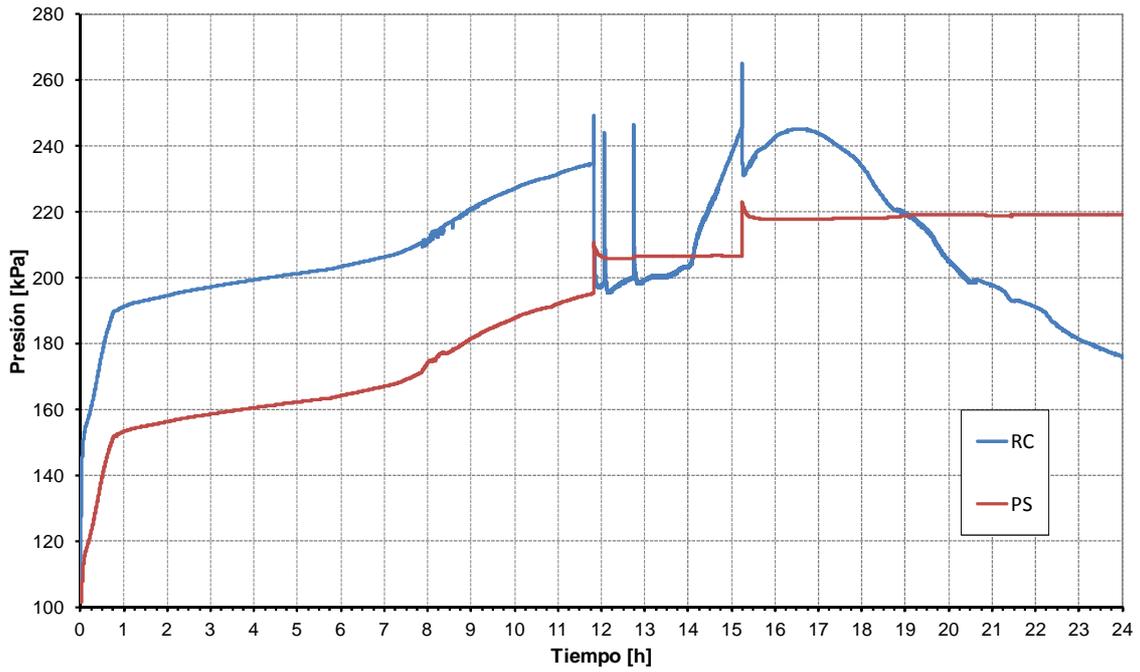


Figura 35: Evolución de la presión para la simulación del caso A del modelo 1D

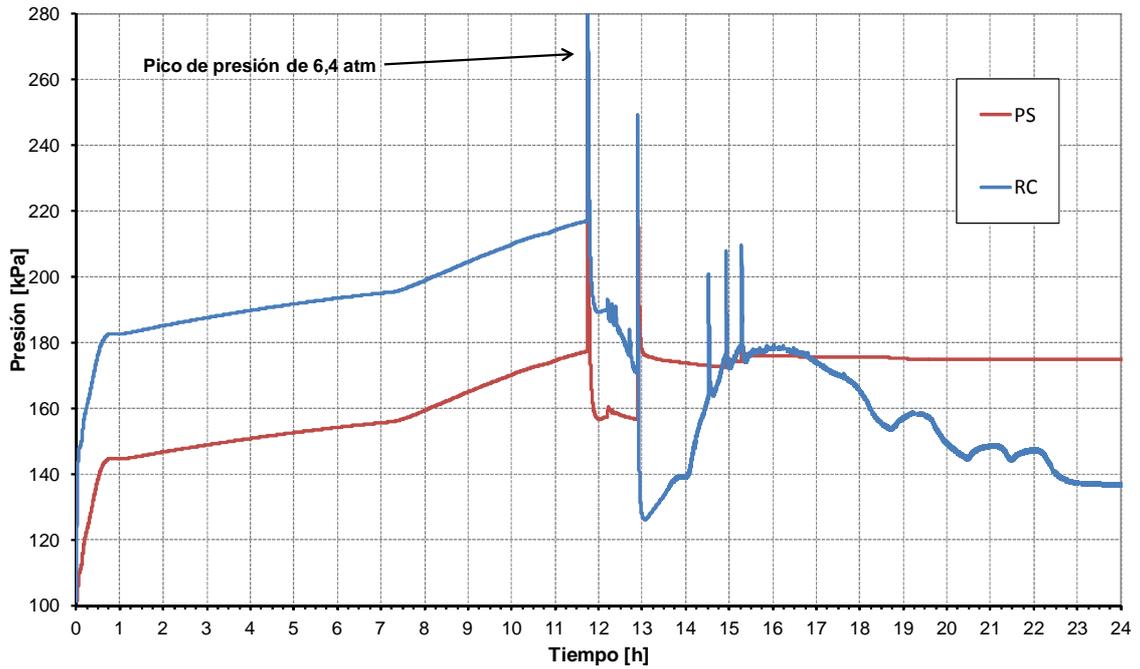


Figura 36: Evolución de la presión para la simulación del caso B del modelo 1D

Intuitivamente, el caso A del modelo 1D parecería ser el más parecido a la secuencia accidental base en cuanto a la evolución del accidente. Sin embargo, su evolución es francamente distinta debido a la nodalización del recinto central. Respecto a la

secuencia accidental base, el pico de presión en el caso A es de 2,7 atm en el RC (vs. 3,7 atm) y de 2,23 atm en la PS (vs. 6,7 atm). La fuerte discrepancia en los valores máximos de presión se debe a que el caso A no presenta la fuerte deflagración en la PS. Una posible explicación a estos resultados es que la inserción de múltiples fuentes en el modelo repercute en problemas numéricos del código. Por otro lado, es necesario destacar que el caso A del modelo 1D no es realista porque la existencia de cinco roturas en RC es muy improbable.

En la Figura 37 se muestra la fracción de hidrógeno en la PS para los casos A y B del modelo 1D, y para el modelo base. Cuando se comienza a liberar el hidrógeno en el RC, la rapidez de crecimiento de la fracción molar de hidrógeno en la PS es idéntica en los tres casos. Sin embargo, en el caso A se produce un quiebre de la pendiente a las 7,8 h, moderando el crecimiento de la fracción molar. Este quiebre de la tendencia de acumulación de hidrógeno en la PS se debe a una débil deflagración en la parte superior de la contención (CV904) debido a una acumulación preferencial del hidrógeno. A partir del instante mencionado, el caso A evoluciona en forma totalmente distinta a los otros dos. El hidrógeno, en lugar de concentrarse preferencialmente en la PS, se distribuye hacia los otros recintos, donde no hay condensación de vapor. Esto explica que en el caso A no llegue a cumplirse la condición de combustión en la PS.

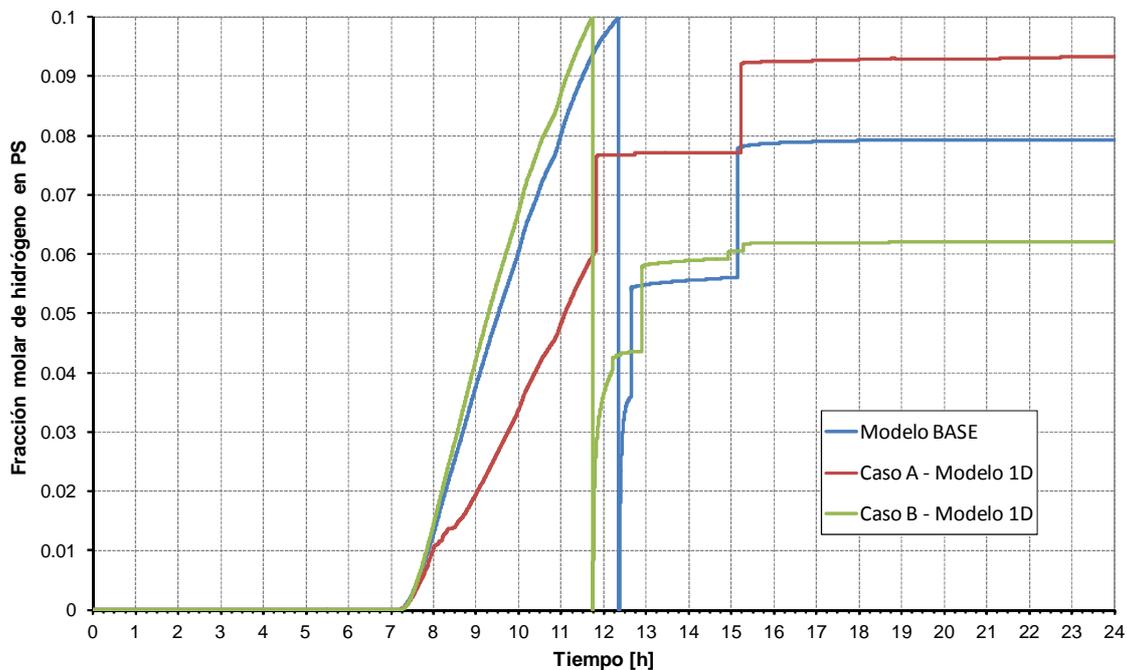


Figura 37: Fracción molar de hidrógeno en la PS. Comparación de los casos A y B del modelo 1D con el modelo base de la contención.

En base a los resultados analizados, se puede concluir que el modelo base predice picos de presión más grandes. Es decir, facilita la acumulación de hidrógeno en la pileta de supresión y esta acumulación es la responsable de la intensa excursión en presión durante la primera deflagración.

No se observaron diferencias apreciables entre los resultados del modelo base y el caso B del modelo 1D en lo que respecta a los valores máximos de presión o al tiempo a la primera deflagración.

7.6.2 Resultados del Modelo 2D de nodalización

Para estudiar el efecto de la nodalización en el progreso del accidente, se utilizó el modelo 2D mencionado y se localizó la rotura de 0,5" del circuito primario en una de las divisiones del recinto central (volumen de control RC901 según la Figura 33) liberando el mismo caudal de vapor e hidrógeno que en la secuencia accidental base.

Como fue mencionado en la descripción de la secuencia accidental base, se produce al inicio del accidente un transporte del aire del RC al resto de los volúmenes de la contención como resultado de la liberación del vapor de agua por la rotura. La masa total del aire que el RC tenía inicialmente se divide, por lo tanto, entre los volúmenes RS, RI y PS. En la Figura 38 se muestra la evolución de la masa de oxígeno de los tres recintos mencionados en las simulaciones de los modelos 2D y base.

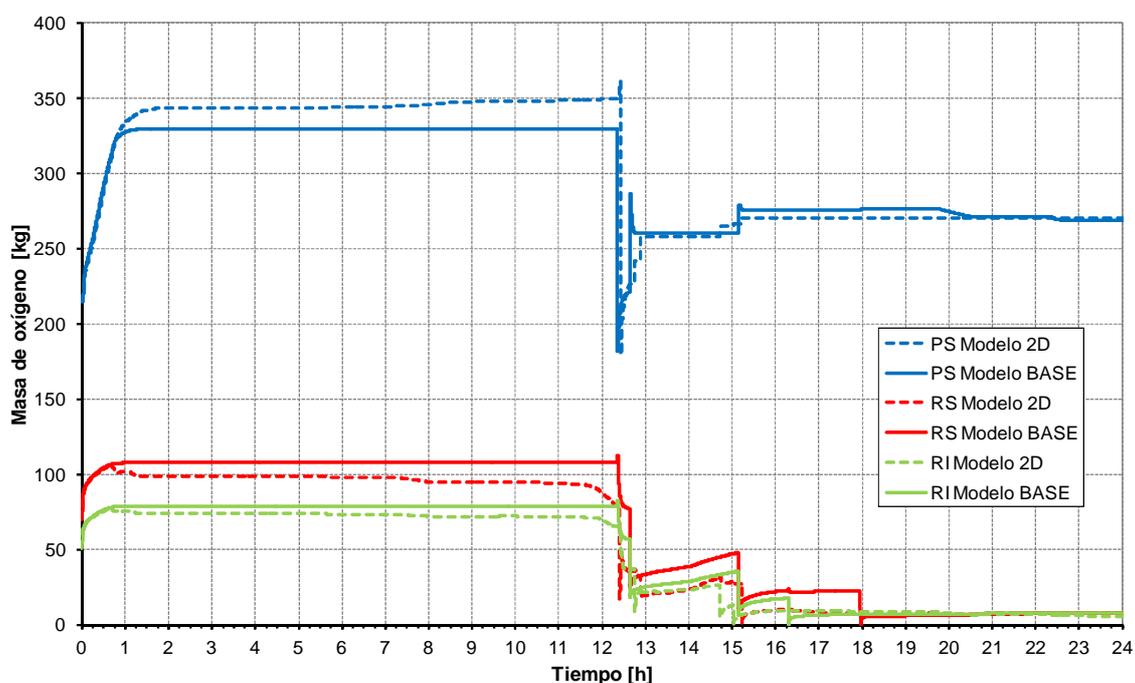


Figura 38: Variación de la masa de oxígeno de PS, RS y RI para las simulaciones de los modelos 2D y base.

De acuerdo a la Figura 38, la nodalización del recinto central influye en la distribución del oxígeno en los recintos luego de transcurridas las primeras dos horas del inicio del accidente. El modelo 2D acumula una masa de oxígeno más grande en la PS respecto al modelo 0D (12 % mayor). Sin embargo, en el modelo 0D se acumula más cantidad de oxígeno en RS y RI respecto al modelo 2D para cumplir la ley de conservación de la masa.

La cantidad de oxígeno en los recintos es importante porque determina la intensidad de las deflagraciones que se producen en ellos. En la secuencia accidental base el oxígeno es desplazado uniformemente de todo el RC y la distribución a los volúmenes restantes se debe solamente a las pérdidas de carga de los Flow Paths FL900, FL901 y FL960. En la simulación con el modelo 2D existe, no obstante, una observación para realizar. La localización de la rotura dentro del RC no se encuentra, en el caso general, a igual distancia de los volúmenes circundantes y esto provoca que los volúmenes de aire desplazados hacia los recintos sean diferentes.

Además de la distribución inicial de oxígeno, el modelo 2D tiene la particularidad de que permite seguir transportando más oxígeno hacia la PS durante el accidente desde los recintos RS y RI. En la Figura 38 se puede ver que, a partir de las 5,5 h, la masa de oxígeno en el modelo 2D de RS y RI empieza a descender, y la masa de oxígeno en la PS crece. Esto se debe a que los loops que se forman en la simulación extraen parte del oxígeno acumulado en RS y RI.

En la Figura 39 se muestra por 6 horas la variación de la fracción molar de hidrógeno en los recintos para el modelo 2D y el modelo base desde que comienza la liberación del mismo. Puede notarse que en el modelo base la fracción de hidrógeno alcanza antes la condición de combustión en la PS, mientras que en el modelo 2D la combustión comienza en RS aproximadamente al mismo instante.

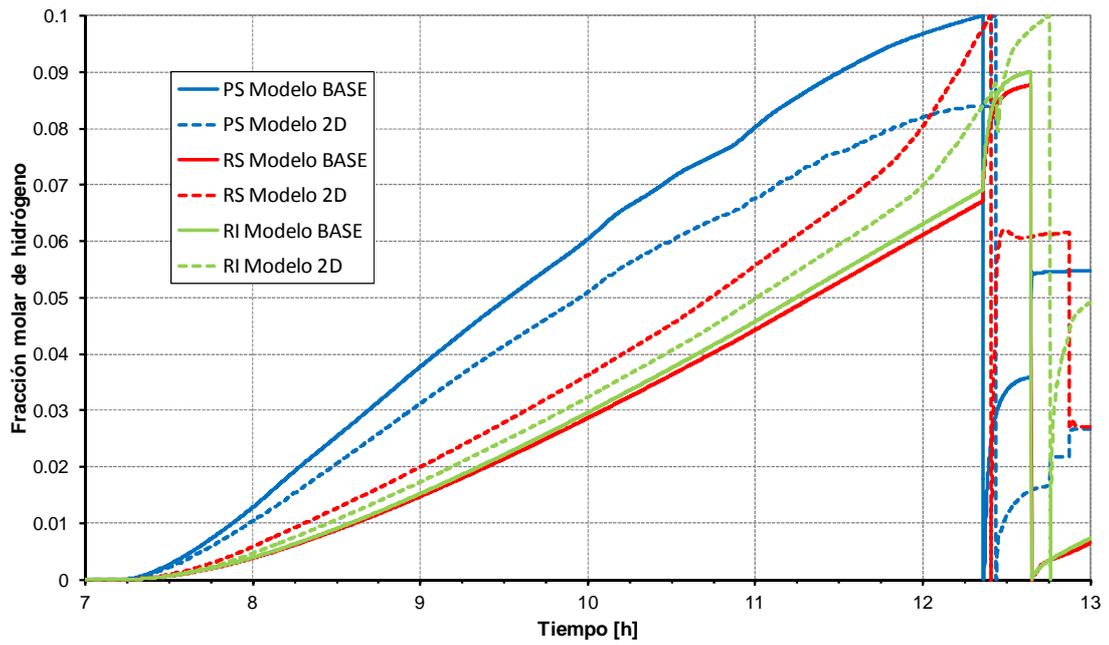


Figura 39: Evolución de la fracción molar de hidrógeno para el modelo 2D y el modelo base

En la Figura 40 se muestra la evolución de la presión en la simulación del accidente con el modelo 2D.

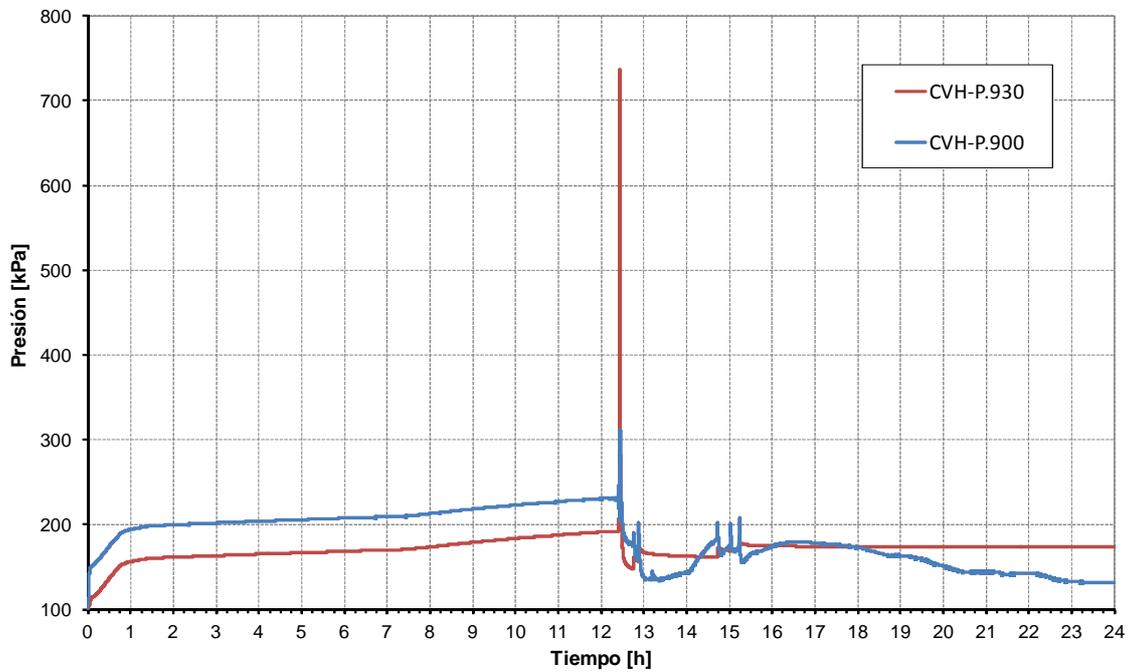


Figura 40: Evolución de la presión en RC y PS para la simulación con el modelo 2D

De la comparación del gráfico anterior con la evolución de la presión para el modelo base (ver Figura 24), se puede ver que en el modelo 2D el pico de presión en la PS es mayor (7,37 atm vs. 6,7 atm). Esta diferencia se debe a la mayor acumulación de oxígeno en la PS en el modelo 2D, como se recalcó oportunamente.

La variación de la fracción molar de hidrógeno en el RC a partir de su liberación se muestra en la Figura 41 para los dos modelos.

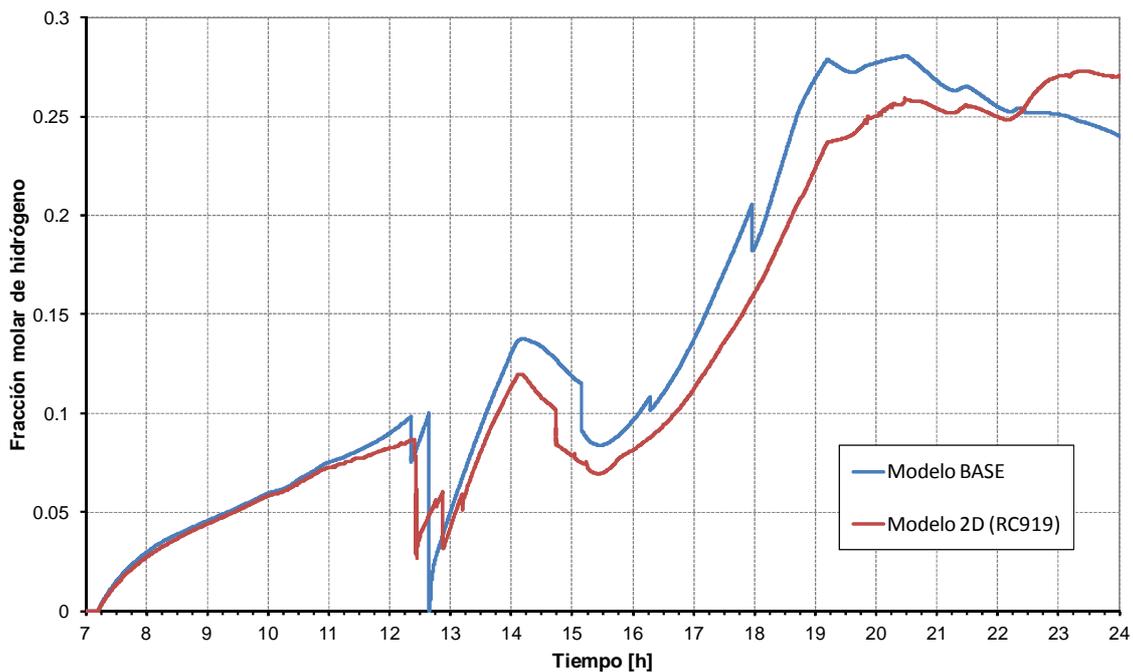


Figura 41: Evolución de la fracción molar de hidrógeno en el RC para las simulaciones con el modelo 2D y base.

En base al análisis realizado, se puede concluir que el progreso del accidente es similar utilizando los dos modelos, pero la localización más precisa de la rotura en el modelo 2D predice una distribución diferente del oxígeno, facilitando su acumulación en la PS y obteniendo como resultado una onda de presión más intensa.

Conclusiones

En primer lugar, se logró comprender la fenomenología característica y las etapas involucradas en la progresión de un hipotético accidente nuclear severo, analizando con mayor detalle los procesos de generación, liberación, y distribución del hidrógeno, así como también los mecanismos de combustión y las reacciones químicas relevantes involucradas.

La herramienta de cálculo utilizada para la simulación de este tipo de accidentes fue el código MELCOR, desarrollado por el Sandia National Laboratories. En el período de aprendizaje del uso del mismo se estudió el alcance de los principales paquetes de cálculo y se entendió, a través de diferentes aplicaciones prácticas, la forma de definir la geometría y las condiciones iniciales y de contorno de un problema particular.

En este trabajo se consideró un modelo de contención de un reactor integrado similar a una contención típica de BWR, con una piletta supresora de presión (PS), un recinto seco central (RC) y recintos secos de sistemas auxiliares en la periferia (recinto superior RS y recinto inferior RI). En una primera etapa se simularon tres tipos de accidentes para familiarizarse con el modelo: pérdida de refrigerante, rotura de línea de vapor vivo y falla de la válvula de alivio del recipiente de presión.

En base a los resultados obtenidos, se implementaron mejoras al modelo inicial. La primera de ellas fue la instalación de una válvula entre la piletta de supresión y el recinto seco central para evitar el vaciamiento parcial de la piletta. También se modificó la conexión a uno de los volúmenes (recinto inferior) para facilitar la despresurización del mismo en casos accidentales. Con estas dos modificaciones se obtuvo el denominado modelo base de la contención del reactor integrado.

El análisis del accidente de pérdida de refrigerante (LOCA) se realizó eligiendo una secuencia accidental base correspondiente a una rotura de 12,7 mm (0,5") y una tasa de liberación de hidrógeno de 5 kg/h, y analizando las primeras 24 horas del accidente. El caudal másico de vapor del accidente se obtuvo de un modelo existente para el sistema primario de un reactor de este tipo, con el código MELCOR. Se inyectó el vapor e hidrógeno en el volumen del recinto central modelado como fuentes de masa y energía. El hidrógeno se comienza a liberar en el RC a las 7,2 horas del inicio del accidente (tiempo en el que se asume que comienza a descubrirse el núcleo). Los rasgos principales de la secuencia accidental base fueron:

- El vapor inyectado desplaza el aire inicial del recinto central hacia los recintos circundantes conectados (PS, RS y RI).
- En la PS, el vapor se condensa por lo que se acumula una gran cantidad de aire y gases no condensables en su atmósfera.
- Cuando se comienza a liberar el hidrógeno en RC, su atmósfera solo tiene vapor.
- El hidrógeno liberado se transporta a PS, RS y RI. En la PS se alcanza por primera vez la condición de combustión al haber una gran cantidad de aire acumulada. Se produce la primera deflagración en la PS, consumiendo el hidrógeno y parte del oxígeno.
- La primera deflagración genera una onda de presión de 6,7 atm en la pileta que impulsa parte del aire de la PS hacia el RC y produce un vaciamiento parcial de la PS (del 16 % de la masa inicial de agua).
- El aire impulsado hacia el RC es suficiente para que alcance la condición de combustión. La deflagración del RC se propaga hacia RS y RI a través de las conexiones.
- Se producen deflagraciones en RS y RI.

Una vez comprendida la secuencia accidental base, se planteó el análisis paramétrico de sensibilidad de los resultados respecto a cuatro factores relevantes en el accidente, a saber: tamaño de la rotura del circuito primario, posición de la misma, tasa de liberación de hidrógeno y efecto de la nodalización del recinto central. A continuación se resumen las principales conclusiones de cada uno de estos factores.

Al aumentar el tamaño de la rotura en el RC, se pudo concluir lo siguiente:

- La presión en el RC se incrementa con mayor rapidez.
- La fracción de aire del RC que se transporta a la PS es mayor porque el transporte a la PS comienza antes.
- La primera deflagración en la PS es ligeramente más intensa.
- Las deflagraciones en RI y RS son más débiles porque tienen menos oxígeno, y desplazan menos cantidad de aire de retorno al RC.
- El RC tiene menos posibilidades de alcanzar la condición de combustión porque la dilución del hidrógeno es más alta y porque reciben menos aire de la combustión de RS y RI.

La variación en la posición de la rotura respecto a la secuencia accidental base permitió determinar que:

- Distintas posiciones de rotura transportan masas de oxígeno diferentes porque el camino desde el volumen con la rotura hacia los demás es distinto.
- La diferencia entre la masa de oxígeno que se concentra en los recintos explica las distintas intensidades de la onda de presión durante la combustión.
- No pudo establecerse una relación funcional entre la cantidad de deflagraciones totales y la posición de la rotura.

De acuerdo a las simulaciones, la influencia de la tasa de liberación de hidrógeno se puede resumir en las siguientes características:

- El tiempo a la primera deflagración varía en forma aproximadamente hiperbólica respecto a la tasa de liberación de hidrógeno.
- La forma hiperbólica de variación del tiempo a la primera deflagración se mantiene cuando la rotura se produce en cualquiera de los recintos secos (RC, RS o RI)
- No pudo determinarse con certeza la correspondencia entre la cantidad total de deflagraciones ni los valores máximos de presión respecto a la tasa de liberación del hidrógeno en la contención.

El efecto de la nodalización del recinto seco central se puede resumir en las siguientes características:

- La discretización del RC permite simular la pérdida de refrigerante en forma más localizada.
- El modelo 1D de la contención presenta diferencias relevantes respecto al modelo base cuando el vapor e hidrógeno se liberan en todo el RC. Esto se produce por la concentración preferencial de hidrógeno en la parte superior de la contención, por lo que no se prevé la primera deflagración en la PS y se generan picos de presión menos importantes.
- El modelo 2D de la contención sugiere una mayor acumulación de oxígeno en la PS respecto al modelo base debido a la distribución de la masa inicial de aire del RC. Este efecto se manifiesta en la generación de una onda de presión más intensa (un 10 % mayor).
- No se observaron diferencias significativas en cuanto al tiempo a la primera deflagración para las distintas nodalizaciones.

Bibliografía

- A. Silde, I. Lindholm. «On Detonation Dynamics in Hydrogen-Air-Steam Mixtures: Theory and Application to Olkiluoto Reactor Building.» 2000.
- Benielli, N. «Simulación de accidentes más allá de la base de diseño con el código MELCOR en un reactor integrado.» 2010.
- C.M. Guirao, R. Knystautas, J.H. Lee. «A Summary of Hydrogen-Air Detonation Experiments.» SNL, 1989.
- Eitner, P. *Explosion Limits of Flammable Gases and Vapors*. 1902.
- Glassman, I. *Combustion*. 2. New York: Academic Press, 1987.
- Grossel, Stanley S. *Deflagration and Detonation Flame Arresters*. New York: John Wiley & Sons., 2010.
- IAEA. «Approaches and Tools for Severe Accident Analysis for Nuclear Power Plants.» Viena, 2008.
- Kuo, Kenneth K. *Principles of Combustion*. 2. John Wiley and Sons INC., 2005.
- Lemmon, A. W. «Studies Relating to the Reaction between Zirconium and Water at High Temperatures.» Battelle Memorial Institute, Columbus, 1957.
- SNL. *5th MELCOR Users' Workshop*. Bethesda, MD, 2001.
- . «MELCOR Computer Code Manuals: Primer and Users' Guide Version 1.8.6.» Vol. 1. Septiembre de 2005.
- . «MELCOR Computer Code Manuals: Reference Manuals Version 1.8.6.» Vol. 2. Septiembre de 2005.
- Wilson, Richard, y Kamal Araj. «Report to the American Physical Society of the Study Group on the radionuclide release from severe accidents at nuclear power plants.» *Reviews of modern physics* 57, nº 3 (1985).
- Z.M. Shapiro, T.R. Moffette. «Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident.» 1957.

Agradecimientos

En primer lugar, le agradezco a Dios. Por ser el sentido de mi vida, porque su amor me alcanza todos los días y porque es mi Salvador. Por todas las bendiciones que me dio desde que llegué a Bariloche, por haberme regalado a gente que nunca voy a olvidar y por ser un amigo que nunca falla. Porque me acompañó todos los días y porque su fidelidad es para siempre.

A mi familia por bancarme desde lejos. A mi mamá por escucharme siempre y entretenerme en el teléfono, y por acompañarme a la distancia. A mi papá por sentir su apoyo y por las llamadas y mensajitos que me mandaba cada vez que tenía examen. A Mariana la Dra. de la familia, a Juanqui y a Sabi porque han sido excelentes hermanos. A Ale por ser mi prima favorita y llamarme siempre por teléfono para charlar y alentarme. A mi abuela, mi baba y mis tías porque también me hicieron sentir que estaban conmigo. A todos ellos gracias también por orar por mí.

A Sergio Papadakis por haberme acompañado. Por sus consejos, por las tardes en bici y por ser mi compañero de pesca, de paseos y de asados. Por todas las tardes que se sentó a estudiar al lado mío para hacerme el aguante. Por las innumerables veces que me ayudó con un montón de cosas y por enseñarme de todo a lo largo de la carrera. Por ser una gran persona, pero mejor amigo.

A todos mis amigos de Bariloche con los que pude pasar momentos tan lindos. A los hermanos de la iglesia que me dieron su apoyo espiritual.

A mis compañeros de la promoción 2009 porque corrieron esta carrera conmigo.

A las personas del grupo de Seguridad Nuclear del Centro Atómico Bariloche por los momentos que pude disfrutar con ellos. A Iván por sus chistes, sus risas y su “Qué tal?”, por contagiarme alegría y por su compañía.

A mis directores Matías y Sergio porque me guiaron en este trabajo, me ayudaron y dedicaron este año un montón de tiempo para enseñarme. Por trabajar incluso fuera de horario y por hacer lo imposible para intentar transformar una máquina de rendir materias en un ingeniero.

A todos ellos mil veces Gracias!