



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
(ENERGÍA) – (SISTEMAS ENERGÉTICOS)

ANÁLISIS TERMOGRÁFICO DE REACTORES NUCLEARES BASADO EN EL CÓDIGO
RELAP/SCDAP

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
HERIBERTO SÁNCHEZ MORA

TUTOR PRINCIPAL
DR. CARLOS CHÁVEZ MERCADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, CD. MX.

Noviembre 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: (Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez)

Secretario: (Dr. Armando Miguel Gómez Torres)

1^{er.} Vocal: (M. en C. Edgar Salazar Salazar)

2^{d o.} Vocal: (Dr. Miguel Ceceñas Falcón)

3^{er.} Vocal: (Dr. Sergio Quezada García)

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Universidad Nacional Autónoma de México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Carlos Chávez Mercado

FIRMA

Abstract

The implementation of display interfaces in the code RELAP/SCDAP is a new analysis window, due to the code before to this thesis did not exist with a display tool of the core components as fuel rods, the control rods, electrically heated rods, shrouds and the BWR (blade/box), showing the variables status with the feedback with temperature in real time. The first version of the code that have with this new tool is the RELAP/SCDAPSIM 3.4, and taking advantage with these visual properties inside its analyzed the CORA-17 experiment. The experiment was made by KIT to the nuclear codes validation at severe accidents scenarios. The code shows the components in a representative way with the hydrogen production, damage level and the temperature, elements for the analysis of CORA-17. The CORA-17 it is a experiment with a BWR bundle containing two kind of rods, some made with UO_2 (no heat supplied) and others made with tungsten, the second rods are electrically heating. The experiment conducted with three phases, however, the thesis it is focused only in the second and third phase. In the second and third phase it is where the experiment gets a strong feedback between the steam, the temperature and the heat by the oxidation reaction. The results of the code are compared against the experimental results, however the code predict less hydrogen production, due to less oxidation reaction, thus the code shows lower temperature in some cases, showing the significant differences in the third phase.

Resumen

En el Capítulo 1 se describen las instalaciones del experimento CORA-17, así como los materiales, dimensiones y las condiciones en las diferentes fases del experimento: fase de precalentamiento, fase transitoria y fase de enfriamiento. El Capítulo 2 aborda sobre la implementación de CORA-17 en el código RELAP/SCDAPSIM 3.4, puntualizando la diferencia entre los componentes SCDAP y componentes RELAP que intervienen en el experimento CORA-17. El Capítulo 3 explica la implementación de la interfaz en el código RELAP/SCDAPSIM 3.4 con base al uso de FORTRAN y OpenGL, donde FORTRAN es la parte lógico-matemática del código y OpenGL forma parte del ambiente gráfico. En el último capítulo, el Capítulo 4, se realiza el análisis de los resultados obtenidos por el código y la nueva herramienta de visualización detallando la interpretación los efectos de retroalimentación y posteriormente, la comparación de resultados experimentales con los generados por el código.

Contenido

Índice de Figuras	7
Índice de Tablas	11
Acrónimos	13
Objetivos	14

Capítulo 1

1.0	Experimento CORA-17	15
1.1	Instalación de CORA-17	17
1.2	Procedimiento experimental de CORA-17	21

Capítulo 2

2.0	Nodalización CORA-17 en RELAP/SCDAPSIM 3.4	24
2.1	RELAP	25
2.2	SCDAP	26
2.3	COUPLE	27
2.4	Nodalización de componentes RELAP	28
2.5	Nodalización de componentes SCDAP	31

Capítulo 3

3.0	Desarrollo de gráficas de contorno en RELAP/SCDAPSIM 3.4	32
3.1	OpenGL	33
3.2	FORTTRAN	34
3.3	Figuras de los componentes SCDAP	34
3.4	Distribución de colores en componentes SCDAP	36

3.5	Interfaz Gráfica en RELAP/SCDAPSIM 3.4	42
3.6	Pleno Inferior	49
Capítulo 4		
4.0	Análisis de resultados en CORA 17 en RELAP/SCDAPSIM 3.4	53
4.1	Reacción de Oxidación	54
4.2	Análisis de CORA-17 con RELAP/SCDAPSIM 3.4	60
4.3	Comparación de temperaturas experimentales	72
Conclusión		81
Trabajo Futuro		82
Referencias		83

Índice de Figuras

Capítulo 1

Fig. 1.1. Configuración del ensamble del experimento CORA 17.	17
Fig. 1.2. Vista axial de la instalación del experimento CORA 17.	18
Fig. 1.3. Potencia suministrada eléctrica al ensamble	22
Fig. 1.4. Flujo de vapor introducido al sistema del experimento.	22
Fig. 1.5. Nivel de agua durante la fase transitoria y fase de enfriamiento.	23

Capítulo 2

Fig. 2.1. Nodalización hidrodinámica de CORA-17 en RELAP/SCDAPSIM 3.4 de Madokoro et col. (2014) con modificación en la numeración de la nodalización.	29
--	----

Capítulo 3

Fig. 3.1. Geometrías primitivas de OpenGL.	33
Fig. 3.2. Representación de la nodalización en coordenadas cilíndricas.	35
Fig. 3.3. Creación de un triángulo en OpenGL.	36
Fig. 3.4. Polígono trazado con OpenGL usando las funciones <i>glBegin</i> y <i>glShadeModel</i> .	38
Fig. 3.5. Barra de distribución de colores dependiendo la temperatura.	38

Fig. 3.6. Cajas de nivel de daño.	40
Fig. 3.7. Configuración de ensambles de combustible en un BWR.	41
Fig. 3.8. Diagrama de bloques para la generación de despliegues.	41
Fig. 3.9 Variación de colores dependiendo la magnitud de la temperatura de diferentes componentes SCDAP.	42
Fig. 3.10. Sistema hidrodinámico de CORA 17 mostrado por la interfaz de RELAP/SCDAPSIM 3.4.	43
Fig. 3.11. Menú principal de RELAP/SDCAPSIM 3.4	44
Fig. 3.12. Menú para la selección de propiedades a mostrar en pantalla.	44
Fig. 3.13. Variación de temperatura de un reactor del tipo BWR.	45
Fig. 3.14. Variación en la generación de hidrógeno en un reactor nuclear de PWR.	46
Fig. 3.15. Nivel de daño en el experimento CORA-18.	47
Fig. 3.16. Barra de temperaturas señalando la mínima y máxima temperatura en el pleno inferior.	49
Fig. 3.17. Selección de la visualización del pleno inferior.	50
Fig. 3.18. Pleno inferior con material fundido recolocado.	51

Capítulo 4

Fig. 4.1. Fotografía de la sección transversal del ensamble de CORA 17 después del Experimento.	55
Fig. 4.2. Comparación de condiciones de potencia suministrada en el experimento con RELAP/SCDAPSIM 3.4.	62
Fig. 4.3. Comparación de condiciones de inserción de vapor en el experimento con RELAP/SCDAPSIM 3.4.	62
Fig. 4.4. Comparación del nivel de agua de enfriamiento en el experimento con RELAP/SCDAPSIM 3.4.	63
Fig. 4.5. Despliegue de componentes SCDAP de CORA-17 en RELAP/SCDAPSIM 3.4.	64
Fig. 4.6. Inicio de la generación de hidrógeno (Kg/s) en el ensamble, tiempo 3523 s.	65
Fig. 4.7. Comparación de la producción de hidrógeno en RELAP/SCDAPSIM 3.4 con el experimento CORA-17.	66
Fig. 4.8. Generación de hidrógeno en el tiempo 4600 s.	67
Fig. 4.9. Inicio de la fase de enfriamiento del ensamble.	68
Fig. 4.10. Temperatura en diferentes tiempos de la fase de enfriamiento.	70
Fig. 4.11. Condiciones finales de temperatura de CORA-17 al tiempo 6000 s.	71
Fig. 4.12. Nivel de daño al tiempo 6000 s de la simulación.	72
Fig. 4.13. Comparación de temperatura de la barra sin calentar a 950 mm.	74

Fig. 4.14. Comparación de temperatura de la barra calentada eléctricamente a 950 mm.	75
Fig. 4.15. Comparación de temperatura de la barra sin calentar a 750 mm.	76
Fig. 4.16. Comparación de temperatura de la barra calentada eléctricamente a 750 mm.	77
Fig. 4.17. Comparación de temperatura de la BWR blade/box a 1150 mm.	78
Fig. 4.18. Comparación de temperatura de la BWR blade/box a 950 mm.	79
Fig. 4.19. Comparación de temperatura de la BWR blade/box a 750 mm.	80

Índice de Tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1. Características de las barras.	19
Tabla 1.2. Características del revestimiento (shroud).	20
Tabla 1.3. Características del revestimiento de aislamiento (shroud insulation)	20
Tabla 1.4. Característica de las barras absorbedoras.	20
Tabla 1.5. Características de el componente BWR (blade sheath).	20
Tabla 1.6. Características de la caja del canal del BWR (channel box).	20
Tabla 1.7. Características de los espaciadores.	20

Capítulo 2

Tabla 2.1. Descripción de los volúmenes hidrodinámicos para CORA-17.	30
--	----

Capítulo 3

Tabla 3.1. Representación de colores con glColor3f.	37
Tabla 3.2. <i>Damage Level (Rods)</i> (nivel de daño de barras).	39
Tabla 3.3. <i>Damage Level (BWR blade/box)</i> (nivel de daño componente laminar BWR (blade/box)).	40

Capítulo 4

Tabla 4.1. Temperaturas de oxidación.	60
Tabla 4.2. Temperaturas de fundición.	60
Tabla 4.3. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.13.	74
Tabla 4.4. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.14.	75
Tabla 4.5. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.15.	76
Tabla 4.6. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.16.	77
Tabla 4.7. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.17.	78
Tabla 4.8. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.18.	79
Tabla 4.9. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.19.	80

Acrónimos

BWR : *Boiling Water Reactor*

FORTTRAN : *FORmula TRANslation*

ISS : *Innovative Systems Software*

KIT : *Karlsruhe Institute of Technology*

OpenGL : *Open Graphics Library*

ORNL : *Oak Ridge National Laboratory*

LOCA : *Loss of Coolant Accidents*

LWR : *Light Water Reactors*

RELAP : *Reactor Excursion and Leak Analysis Program*

SCDAP: *Severe Core Damage Analysis Package*

Objetivos

Implementación de herramientas visuales para el análisis de accidentes severos en los componentes del núcleo añadidos al código RELAP/SCDAPSIM 3.4 y, a su vez, el análisis del experimento CORA-17 con dichas herramientas.

Capítulo 1

1.0 Experimento CORA-17

Los experimentos Quench [1], se traduce como enfriamiento súbito del núcleo, se realizaron con la finalidad de inducir daño severo en un evento transitorio a los elementos de combustible en reactores tipo LWR (Light Water Reactors). Este tipo de daño se lleva a cabo por la inundación del núcleo sobrecalentado con la finalidad de enfriar los elementos inmersos en él. Sin embargo, antes de obtener el enfriamiento, se presenta una reacción de oxidación en el revestimiento de Zircaloy, como también en elementos que contienen B_4C , produciendo una reacción exotérmica que aumenta la temperatura del núcleo y a su vez genera hidrógeno. El fenómeno en su totalidad aún no se puede determinar con precisión, debido a los extensos mecanismos de retroalimentación del sistema y sus elementos. El KIT (Karlsruhe Institute of Technology), fue el instituto encargado de la elaboración de este tipo de experimentos, donde, de los experimentos Quench se desprenden también los experimentos LOCA (Loss of Coolant Accidents) y CORA.

Los experimentos CORA, de los cuales CORA-17 [2] forma parte de ellos, corresponden a experimentos realizados por el KIT con la finalidad de recabar información sobre los mecanismos de daño en elementos combustibles de reactores de agua ligera bajo condiciones de daño severo. En estos experimentos el calor de decaimiento se simula por medio de una barra de tungsteno calentada eléctricamente, la cual se coloca dentro de pastillas anulares en un encamisado de Zircaloy. El ensamble de prueba consiste en un arreglo de 12-18 barras calentadas con una longitud de 1000-

1500 mm y 6-9 barras no calentadas (pastillas solidas), rodeadas por una cubierta de Zircaloy. La cubierta se encuentra aislada con material fibroso de ZrO_2 para obtener una distribución de temperatura uniforme.

CORA 17 corresponde a un ensamble BWR (Boiling Water Reactor), por los componentes que lo constituyen. El experimento tiene como propósito analizar el cambio de temperatura debido a la inundación súbita del núcleo, ya que las barras de combustible revestidas con Zircaloy y los elementos de control constituidos por B_4C no producen un descenso inmediato en la temperatura debido a la reacción exotérmica que se presenta al contacto con el agua que va aunado con un pico de generación de hidrógeno. Bajo las condiciones experimentales, el Zircaloy lejos de proteger la integridad de los elementos de combustible, reacciona violentamente con la inundación en una reacción de oxidación que es directamente proporcional en magnitud al espesor del ZrO_2 que se va acumulando, que crece a medida del aumento de su temperatura generando agrietamientos que facilitan la difusión de calor y la reacción química exotérmica se ve favorecida, aumentando exponencialmente con la consecuente producción de hidrógeno. En este capítulo se muestran las características del experimento CORA-17, sus componentes, las condiciones iniciales y transitorias para provocar daño severo al ensamble combustible.

1.1 Instalación de CORA-17

El experimento CORA 17 consiste en un ensamble de combustible de tipo BWR con barras de combustible calentadas y sin calentar. El calor de decaimiento es simulado eléctricamente por una diferencia de potencial en las barras calentadas. En la Figura 1.1 se muestra la sección transversal del ensamble para CORA-17 y en la Figura 1.2 la vista axial.

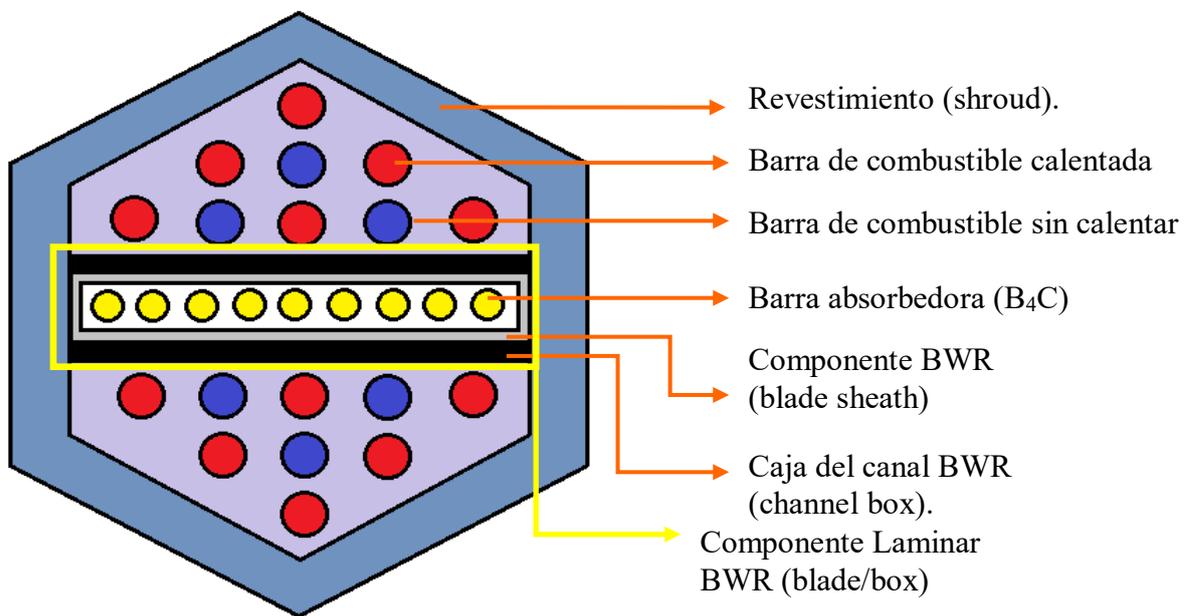


Fig. 1.1. Configuración del ensamble del experimento CORA 17.

Los componentes que comprende la Figura 1.1 son: barras de combustible de distintos materiales, dependiendo si es una barra calentada eléctricamente o no, un componente laminar BWR blade/box que está compuesto por las barras absorbedoras, el BWR (blade sheath) y el BWR (channel box). Y en la periferia del ensamble un revestimiento de ensamble (shroud). El sistema tiene 18 barras de combustible, donde 6 de ellas no tienen calor suministrado y están compuestas de pellets de UO₂ enriquecido al 0.2% en U-235 y un revestimiento de Zircaloy-4 compuesto en fracción peso de Sn: $1.33 \pm 0.2\%$ wt, Fe: $0.23 \pm 0.002\%$ wt, Cr: $0.12 \pm 0.0003\%$ wt, O: $0.116 \pm 0.003\%$ wt, Zr: balanceado

[3], las 12 barras restantes, están compuestas de tungsteno en la parte central y en la periferia de uranio enriquecido al 0.2%, el revestimiento sigue siendo Zircaloy-4. A estas barras se les suministra calor mediante una diferencia de potencial. Las pastillas de las barras absorbedoras contienen B_4C , con revestimiento de acero inoxidable. El componente BWR (blade sheath) está constituido por acero inoxidable. La caja del canal del BWR (Channel box) está hecha de Zircaloy-4. El aislamiento del sistema de las barras de combustible y BWR blade/box cuenta con un revestimiento (shroud) compuesto de Zircaloy-4. Todo el ensamble tiene un revestimiento de aislamiento que no se muestra en la Figura 1.1 ya que no es parte del ensamble.

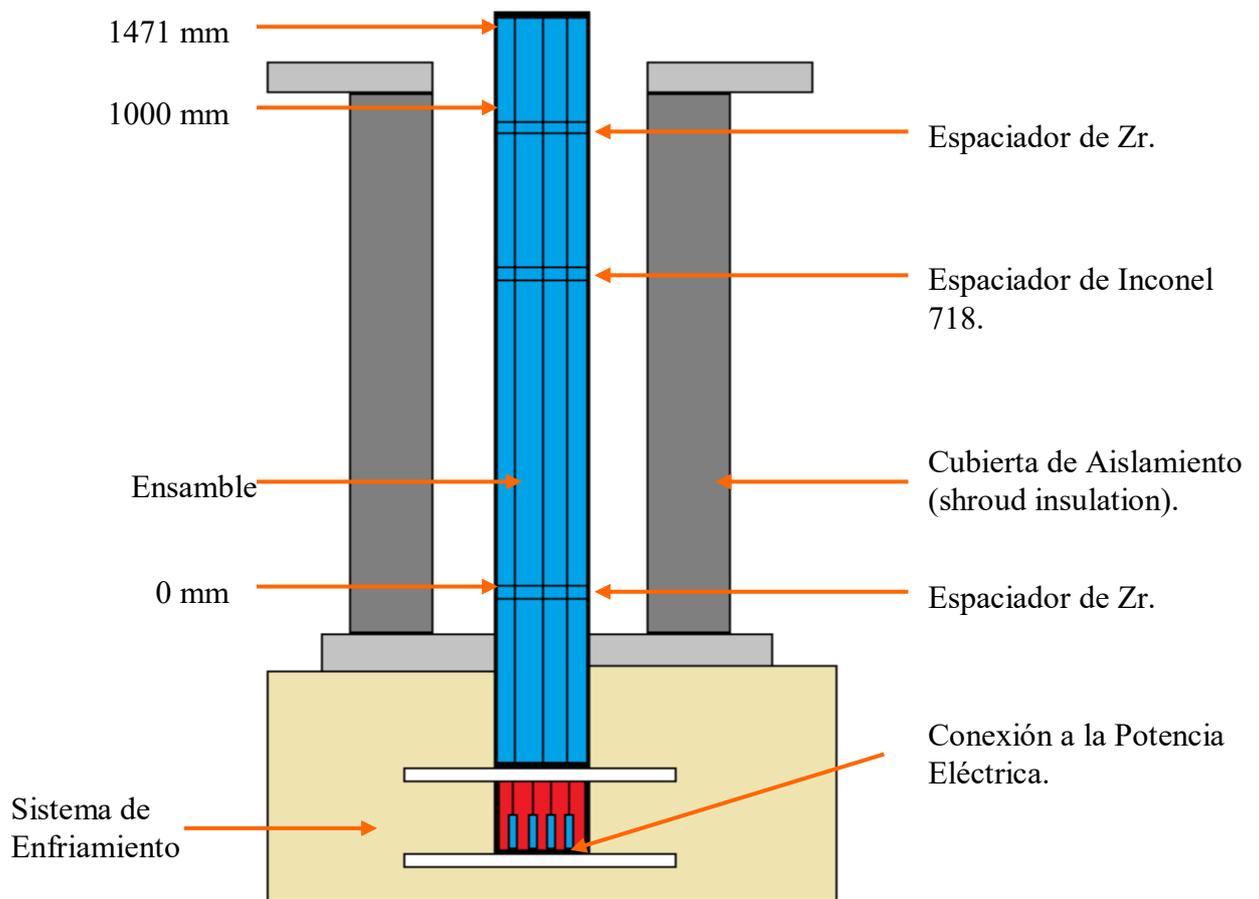


Fig. 1.2. Vista axial de la instalación del experimento CORA 17.

En la Figura 1.2 se observa una representación del sistema del experimento desde una vista axial apreciando otros componentes a diferencia de la Figura 1.1. Los espaciadores

de las barras se encuentran en diferentes posiciones, en el fondo un espaciador de Zircaloy-4, al igual que otro en la parte superior del mismo material y uno más, cerca del centro del ensamble hecho de Inconel 718 que está constituido en fracción peso de 54 wt% Ni, 18 wt% Cr, 18 wt% Fe, 2.9 wt% Mo. El sistema constituido por el ensamble y sus componentes inmersos en él, se encuentra dentro de un revestimiento de aislamiento (shroud insulation) fabricado con fibra de ZrO₂.

De la Figura 1.2, las barras calentadas están conectadas a un suministro de energía eléctrica desde el fondo hasta el punto superior. El nivel de 0 mm del sistema se encuentra en el extremo inferior de las barras a las que se les suministra energía eléctrica. En la parte inferior, a -200 mm, se sitúa un sistema de enfriamiento que permite la inmersión de agua al sistema de manera controlada. En las Tablas 1.1-1.7, se muestran los datos técnicos de los elementos que componen la instalación de CORA-17.

Tabla 1.1. Características de las barras.

Ensamble	BWR
Número de Barras	18
Número de Barras Calientes	12
Número de Barras sin Calentar	6
Pitch	14.3 mm
Diámetro Exterior de la Barra	10.75 mm
Material del Revestimiento	Zircaloy - 4
Espesor del Revestimiento	0.725 mm
Longitud de la Barra Caliente	1840 mm (-369 mm a 1471 mm)
Longitud de la Barra sin Calentar	1672 mm (-201 mm a 1471 mm)
Pila de Pastillas Calientes	0 a 1000 mm
Material de los Pastillas Calientes	Tungsteno (W)
Diámetro de Pastillas Calientes	6 mm
Combustible en Pastillas Calientes	UO ₂ (parte anular)
Combustible de Pastillas sin Calentar	UO ₂ (totalmente)

Pila de Pastillas sin Calentar	-200 mm a 1300 mm
U-235 enriquecido	0.2 %
Diámetro Exterior de la Pastilla	9.1 mm

Tabla 1.2. Características del revestimiento (shroud).

Material	Zircaloy-4
Espesor de la Pared	1.2 mm
Dimensiones Externas	94.4 mm × 116 mm
Elevación	40 mm a 1235 mm

Tabla 1.3. Características del revestimiento de aislamiento (shroud insulation).

Material	Fibra de ZrO ₂
Grosor de aislamiento	19 mm
Elevación	40 mm a 1110 mm

Tabla 1.4. Característica de las barras absorbedoras.

Número de barras	11
Material	B ₄ C
Material del revestimiento	Acero inoxidable
Diámetro externo del revestimiento	5.8 mm
Diámetro interno del revestimiento	4.6 mm
Longitud	1600 mm
Longitud del material absorbedor	-270 mm a 1300 mm

Tabla 1.5. Características de el componente BWR (blade sheath).

Material	Acero inoxidable
Dimensiones internas	76 mm × 6 mm
Espesor	1 mm

Tabla 1.6. Características de la caja del canal del BWR (channel box).

Material	Zircaloy-4
Dimensiones internas	13 mm × 92 mm
Grosor de la pared	1.2 mm

Tabla 1.7. Características de los espaciadores.

Material	Zircaloy-4 / Inconel 718
Longitud de espaciador de Zr-4	42 mm
Longitud de espaciador de Inconel 718	38 mm
Posición de espaciadores Zr-4	-5 mm / 880 mm
Posición de espaciador Inconel 718	496 mm

1.2 Procedimiento experimental de CORA-17

El experimento realizado por KIT [4] tiene 3 etapas para su ejecución: la fase de precalentamiento (0 s a 3000 s), la fase transitoria (3000 s a 4900 s) y la fase de enfriamiento (4900 s a 6000 s). Sin embargo, por cuestiones de interés solo se analiza de la fase transitoria en adelante, es decir, sólo se toman en cuenta los valores obtenidos a partir del tiempo 3000 s hasta 6000 s para el análisis del daño severo, debido a que la primera fase es la de precalentamiento y no representa algo significativo para esta tesis. Bajo una presión absoluta de 0.22 MPa, la segunda fase, la fase transitoria, la cual sucede entre los 3000 s hasta los 4900 s del experimento, se provoca un aumento de temperatura de 1 K/s debido al incremento de potencia eléctrica disipada en a las barras calientes desde los 6 kW y se mantiene a 26 kW entre los 4400 s hasta la culminación de la fase, Figura 1.3. En el tiempo 3300 s, se introdujo un flujo de vapor de 2 g/s al sistema y se suspende al finalizar la fase, Figura 1.4. La tercera fase, la fase de enfriamiento, comienza con el apagado repentino del suministro de energía eléctrica en el tiempo 4900 s, aproximadamente, hasta los 6000 s que dura el experimento. La inundación del ensamble se retrasa 150 s, ya que se aumenta el nivel del agua en el ensamble a una razón promedio de 1 cm/s a partir de la posición -200 mm, Figura 1.5. Lo anteriormente mencionado representa las condiciones iniciales del experimento.

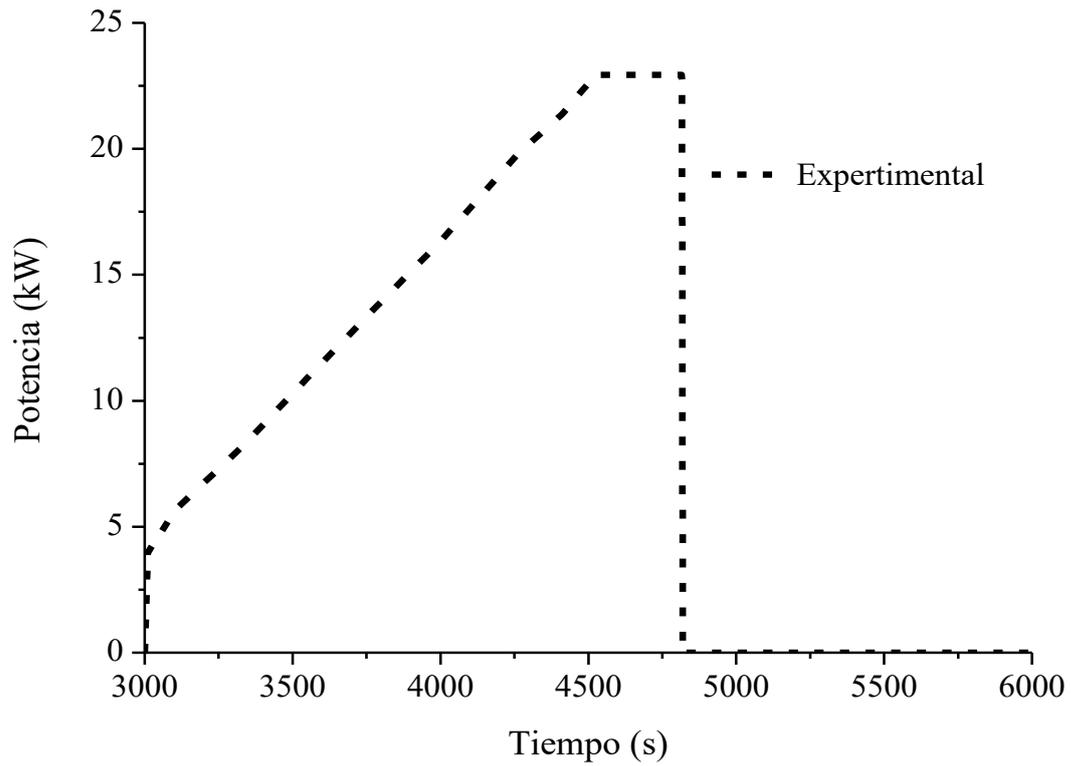


Fig. 1.3. Potencia eléctrica suministrada al ensamble.

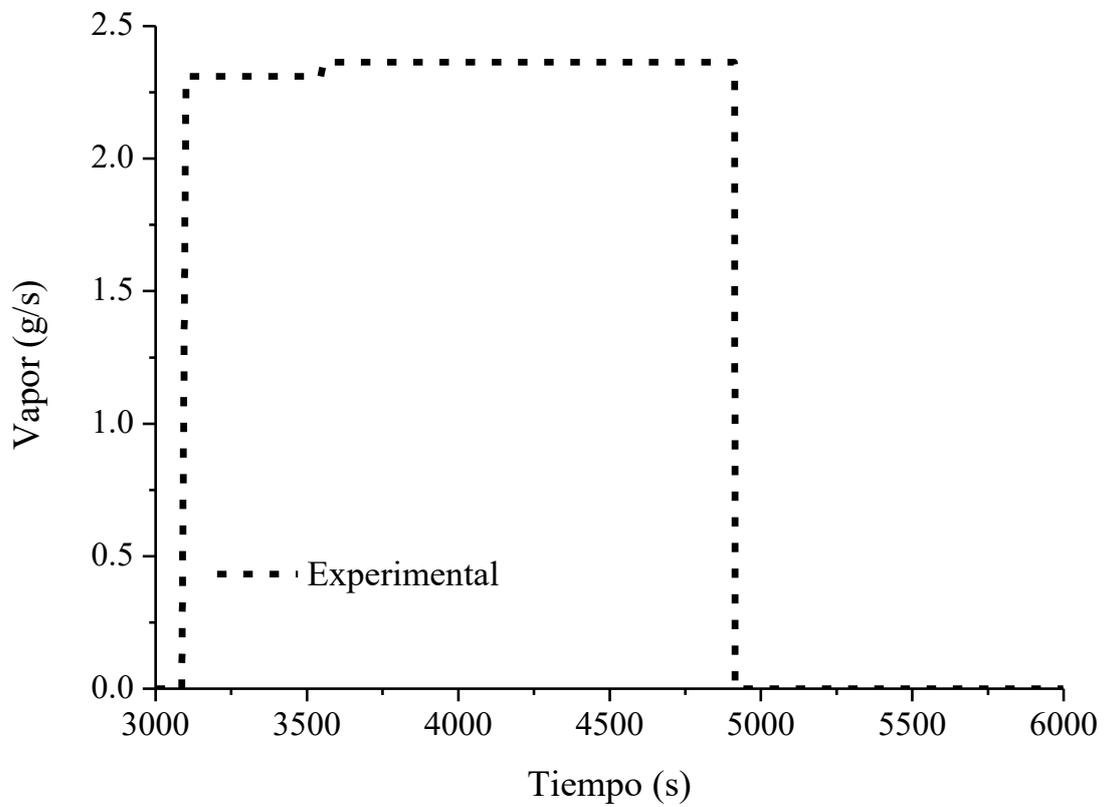


Fig. 1.4. Flujo de vapor introducido al sistema del experimento.

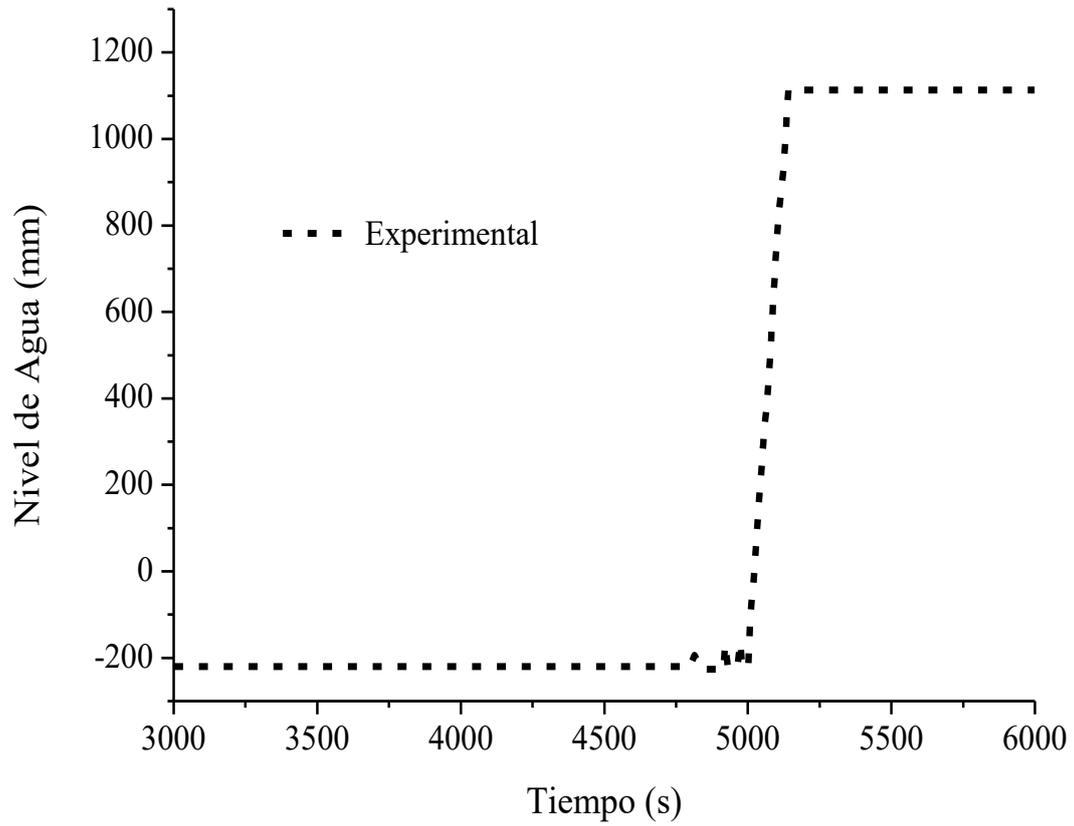


Fig. 1.5. Nivel de agua durante la fase transitoria y fase de enfriamiento.

En el capítulo 2 se muestra la implementación del experimento CORA-17 en el código RELAP/SCDAPSIM 3.4.

Capítulo 2

2.0 Nodalización CORA-17 en RELAP/SCDAPSIM 3.4

Este capítulo aborda la implementación del experimento CORA-17 en el código RELAP/SCDAPSIM 3.4, el cual es un código de mejor estimación en termohidráulica para reactores nucleares. RELAP (Reactor Excursion and Leak Analysis Program), SCDAP (Severe Core Damage Analysis Package) y COUPLE (pleno inferior) forman parte de un mismo código donde cada uno tiene diferente propósito en él. El código es integrado es utilizado para el análisis de accidentes nucleares severos, procedimientos operacionales, estrategias para la elaboración de experimentos y licenciamiento. Es un código bastante versátil para la simulación de transitorios de sistemas hidráulicos en sistemas nucleares y no nucleares. Tiene la capacidad de predecir sucesos en elementos de combustible durante daño severo, deformación y fundición de los componentes. Por lo anterior, RELAP/SCDAPSIM 3.4 reúne los elementos para el modelado y simulación del experimento CORA-17, ya que considera tanto los efectos de daño en los componentes del ensamble como las reacciones químicas que interactúan en el experimento.

2.1 RELAP

RELAP, es un código de simulación de procesos termohidráulicos con flujo bifásico, lo que quiere decir que puede resolver un modelo de flujo de dos fluidos en coexistencia, líquido y gas, por medio de métodos numéricos semi-implícitos aplicados a ecuaciones diferenciales parciales no lineales, como lo es el método de diferencias finitas que resuelve el código para las ecuaciones de conservación de momento, energía y masa, dependientes del tiempo y unidimensionales. Cada una de las ecuaciones de conservación es resuelta para cada una de las fases, es decir, las ecuaciones de conservación de momento, masa y energía son resueltas tanto para la fase líquida como para la fase gaseosa dando un número total de 6 ecuaciones con una variable espacial y una temporal independientes, y las variables dependientes en promedio volumétrico, de tales variables dependientes se tienen la energía interna específica para cada fase, la fracción de vacío y velocidades de las fases. Este modelo general para el flujo en dos fases requiere el uso de ecuaciones constitutivas para relacionar ambas fases, donde las más importantes son la transferencia de masa, transferencia de energía y transferencia de momento a través de las interfaces y son consideradas en el código [5]. La nodalización del código permite una cantidad menor a 100 nodos axiales por componente hidrodinámico: *pipe* [6].

Debido a la capacidad de solución de RELAP, tiene una amplia gama de aplicaciones no solo nucleares, sino para cualquier sistema que involucre las ecuaciones de conservación entre los rangos de funcionamiento del código, pues en primera instancia, es un código de aplicación de termohidráulica nuclear, por lo que el sistema no llega a operar a temperaturas donde el agua esté en fase sólida. Los componentes de RELAP,

volúmenes hidrodinámicos: *pipes*, canales de combustible, estructuras de calor, volúmenes, volúmenes fuentes o reservorios, bombas, sistemas de control, turbinas, separadores de vapor, bombas jet, válvulas, barras de combustible, barras de control y componentes de la cinética del reactor.

2.2 SCDAP

Por parte de SCDAP, responde para componentes del núcleo de un reactor como lo son las barras de combustible, barras calentadas eléctricamente, barras de control, componentes BWR (blade/box) y revestimientos (Shroud). Los componentes que contiene la versión de RELAP/SCDAPSIM 3.4 para simulación de reactores nucleares son los contenidos en los reactores de agua ligera, esto quiere decir para componentes del núcleo en reactores térmicos. Para los componentes SCDAP se resuelve la ecuación de transferencia de energía de manera transitoria y bidimensional mediante el método de diferencias finitas [7], y considera el daño inducido a los elementos como deformaciones, hinchamiento y ruptura de las barras de combustible, oxidación, liberación de productos de fisión, fusión de Zircaloy, disolución de UO_2 , ruptura de ZrO_2 , flujo y solidificación de combustible fundido y revestimiento, formación y comportamiento de residuos. Aunque el código permite la nodalización de los componentes SCDAP con un límite de 100 nodos radiales y axiales como lo es para el caso de los componentes RELAP en los nodos axiales. Para el caso del componente BWR (blade/box), trae por defecto la nodalización de 14 nodos radiales debido a su complejidad de tener contemplado varias estructuras en una misma como lo son la BWR (channel box), las barras de control y la BWR (blade sheath), dejando la capacidad de 100 nodos axiales [8]. Para la lectura de datos de entrada de los

componentes del núcleo que son introducidos en el *input-file* es necesario que se sometan 4 controles comparativos bajo los límites físicos que el código comprende, el primero de ellos es la comparación del radio de los pellets de combustible no sea mayor que el radio del revestimiento interno de la barra, el segundo es la consistencia de datos de entrada como lo puede ser algún nodo omitido en la asignación de valores en el material quede fuera de la frontera del material, la tercera es la comprobación de la cantidad palabras necesarias para cada tarjeta y, el último valor comparativo, es la consistencia del tipo de variable que corresponda en función del tipo de tarjeta. Una quinta verificación se da durante el proceso de lectura para asegurar que los datos añadidos están dentro del rango normal para ejecución del código [9].

Para considerar el aspecto hidrodinámico en los componentes SCDAP, los componentes *pipes* de RELAP son asociados a componentes SCDAP para la interacción de los fluidos. El método de asociación para las barras de SCDAP es mediante el método canal promedio, lo cual consiste en el uso de una barra promedio comprometida a un canal de flujo promedio. En efecto, se puede asociar el mismo canal de flujo o *pipe* a más de un componente de barra SCDAP, dependiendo de la especificación de la simulación.

2.3 COUPLE

COUPLE, es una simulación del pleno inferior donde, a partir del daño y la fundición de los componentes del núcleo, se puede inferir el desarrollo del accidente, si es lo que se desea. Aporta información acerca de la temperatura en el pleno inferior considerando los escombros del material recolocado, qué tipo de material ha sido recolocado en él, la porosidad del material fundido, entre otros elementos aunados a daño severo al núcleo.

A diferencia de SCDAP y RELAP, en esta parte de RELAP/SCDAPSIM 3.4 las ecuaciones de transporte de energía, momento y masa son resueltas mediante el método de elemento finito debido a su geometría semiesférica.

2.4 Nodalización de componentes RELAP

El código RELAP/SCDAPSIM 3.4 resuelve, como ya se mencionó, las ecuaciones de conservación mediante el método de diferencias finitas y elemento finito, por lo que el sistema nodalizado presenta un aspecto como se muestra en la Figura 2.1, a partir de un archivo de entrada (*input-file*), el cual es un archivo que contiene la información y las características del sistema a simular por el usuario, y que el código hace lectura para su ejecución. En la Figura 2.1, se aprecia el sistema nodalizado del experimento CORA-17 asignando un número a cada uno de los componentes, los cuales son denominados volúmenes.

RELAP/SCDAPSIM 3.4 es la versión del código con la cual se simula CORA-17 para esta tesis. Esta versión tiene como objetivo, a diferencia de las anteriores, predecir el comportamiento de los sistemas de control, los sistemas de recirculación del refrigerante y los componentes del núcleo de reactores nucleares en escenarios nominales y de daño severo específicamente para “*simulaciones más rápidas que en tiempo real*” y mejoramiento de correlaciones de fluidos y modelaje de barras de combustible.

El *input-file* de CORA-17 fue implementado en un principio por ORNL (Oak Ridge National Laboratory). Actualmente se ha modificado el *input-file* por Madokoro et col. (2014) para su uso en el código RELAP/SCDAPSIM 3.4 y el cual es el utilizado en

esta simulación [10] cambiando la numeración de algunos componentes en la nodalización que consta de volúmenes de control, uniones entre volúmenes y de flujo cruzado, y componentes que simulan las barras de combustible, la zona intersticial y el ensamble. En la Figura 2.1, representa la nodalización de CORA-17.

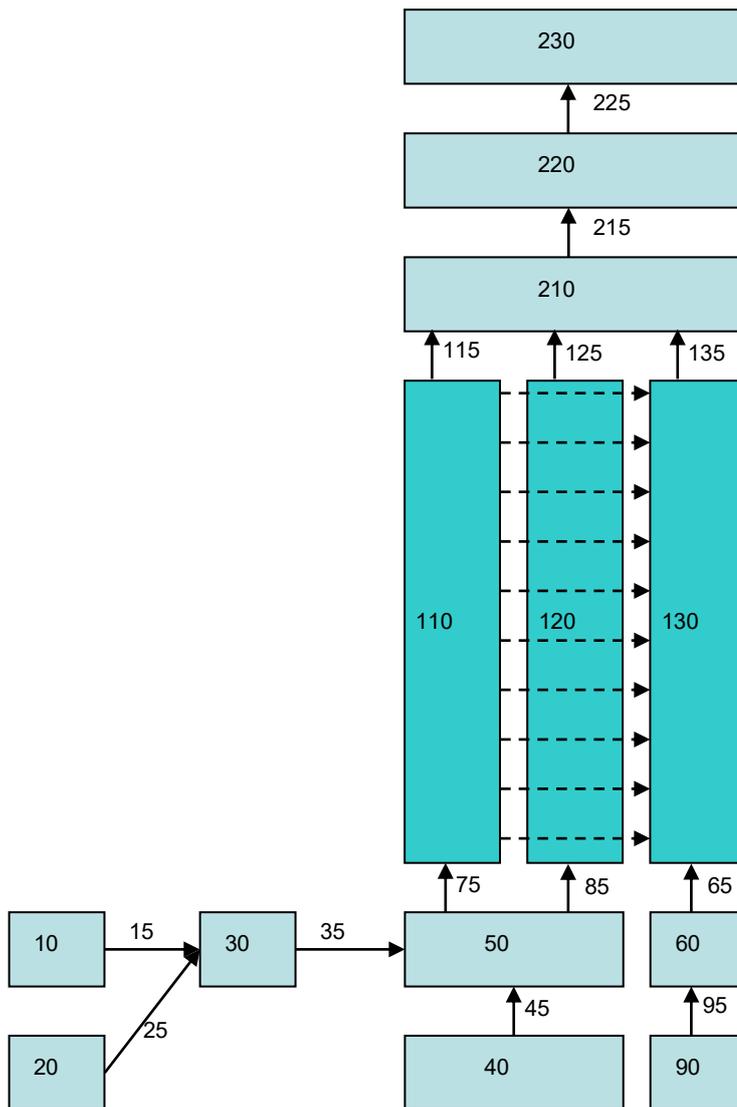


Fig. 2.1. Nodalización hidrodinámica de CORA-17 en RELAP/SCDAPSIM 3.4 de Madokoro et col. (2014) con modificación en la numeración de la nodalización.

En la Figura 2.1, se muestran las uniones entre volúmenes con flechas y el flujo cruzado con flechas punteadas. Cada uno de los elementos están señalados con un número, el

cual corresponde al número de volumen en el *input-file*. La Tabla 2.1 contiene una descripción breve de los volúmenes considerados en la nodalización de CORA-17.

Tabla 2.1. Descripción de los volúmenes hidrodinámicos para CORA-17

No. de Volumen	Descripción
10	Fuente de vapor
20	Fuente de argón
30	Tubo de entrada al ensamble
40	Fuente de agua de enfriamiento
50	Tubo de distribución de vapor
60	Región anular inferior
90	Fuente de agua de enfriamiento
110	Región hidrodinámica del ensamble de combustible
120	Región intersticial del ensamble
130	Región anular del ensamble
210	Región del pleno superior (vol. 1)
220	Región del pleno superior (vol. 2)
230	Separador de vapor

La región del pleno superior está diseccionada en dos volúmenes (210 y 220) para la mezcla de gases, básicamente resultan ser una *pipa* de dos volúmenes especificada para el flujo de vapor de agua.

2.5 Nodalización de componentes SCDAP

Los componentes SCDAP para la simulación de CORA-17 son una barra de combustible promedio, una barra calentada eléctricamente promedio, un componente BWR (blade/box), un revestimiento para el ensamble (shroud) y un revestimiento de aislamiento del sistema (shroud insulation).

Los volúmenes 110, 120 y 130 de la Figura 2.1, representan el conjunto de componentes hidrodinámicos en el ensamble y están asociados a los componentes SCDAP para la interacción con el flujo del fluido que se encuentre en ellos. La cantidad de nodos axiales son 12 con una distancia entre cada nodo de estos volúmenes de 100 mm, para generar una aproximación de las medidas reportadas en el experimento, mismas características que cumplen los componentes SCDAP. El volumen 110 es el componente hidrodinámico para el flujo de refrigerante asociado tanto para la barra de combustible calentada eléctricamente como para la barra de combustible sin calentar, ambas con el método de canal promedio. El volumen 120 tiene como función de simular la región intersticial del ensamble. Como se muestra en la Figura 1.1, el ensamble tiene un arreglo hexagonal entre sus barras de combustible, tiene un componente BWR (blade/box) con barras de control en el interior, y para emular los elementos que obstruyen el flujo cruzado se añade el volumen 120. El volumen 130 está asociado al revestimiento del ensamble (shroud) y simula el flujo a través él.

Para obtener una imagen ilustrativa de los componentes SCDAP en el siguiente capítulo se muestra la implementación de despliegues gráficos al código RELAP/SCDAPSIM 3.4 con la finalidad de aumentar el nivel de análisis en estos elementos.

Capítulo 3

3.0 Desarrollo de gráficas de contorno en RELAP/SCDAPSIM 3.4

Dada la dificultad de visualización de los procesos que resuelve RELAP/SCDAPSIM 3.4 se han añadido herramientas de visualización de componentes SCDAP, ya que son componentes en los que se consideran gran cantidad de procesos como lo son los niveles de daño a componentes, reacciones químicas de oxidación y de generación de hidrógeno, temperatura del componente, presión interna de los componentes, etc. Lo cual representa una cantidad considerable de información y, con base en la aplicación OpenGL (Open Graphics Library) integrada al lenguaje de programación FORTRAN 77 (*FORmula TRANslation*), se han desarrollado herramientas que permiten una visualización de estos componentes en tiempo real de simulación mediante variables seleccionadas de SCDAP para el análisis de CORA-17, resultando despliegues gráficos bastante versátiles, para visualizar gran cantidad de simulaciones facilitando la interpretación de experimentos.

3.1 OpenGL

OpenGL [11] es una librería para la implementación de gráficos en 2D y 3D a partir de geometrías simples, como lo son puntos, líneas, polígonos, etc. como se muestra en la Figura 3.1 con su respectivo argumento, que permiten elaborar cuerpos con formas más complejas. Está diseñado con 250 comandos que pueden ser usados para la generación de objetos. Inicialmente fue producido con el lenguaje de programación C, sin embargo, a lo largo del tiempo se ha podido darle la capacidad de funcionar en otros lenguajes de programación al ser llamado. En el caso de RELAP/SCDAPSIM 3.4 se aprovecha esa capacidad, ya que el código está escrito en su totalidad en FORTRAN entonces, para generar la interfaz gráfica para usuarios se le implementaron las bibliotecas de OpenGL para FORTRAN 77.

OpenGL ha sido útil para la creación de simuladores de realidad virtual, visualización de información científica, vídeo juegos, simuladores de vuelo y representación de información.

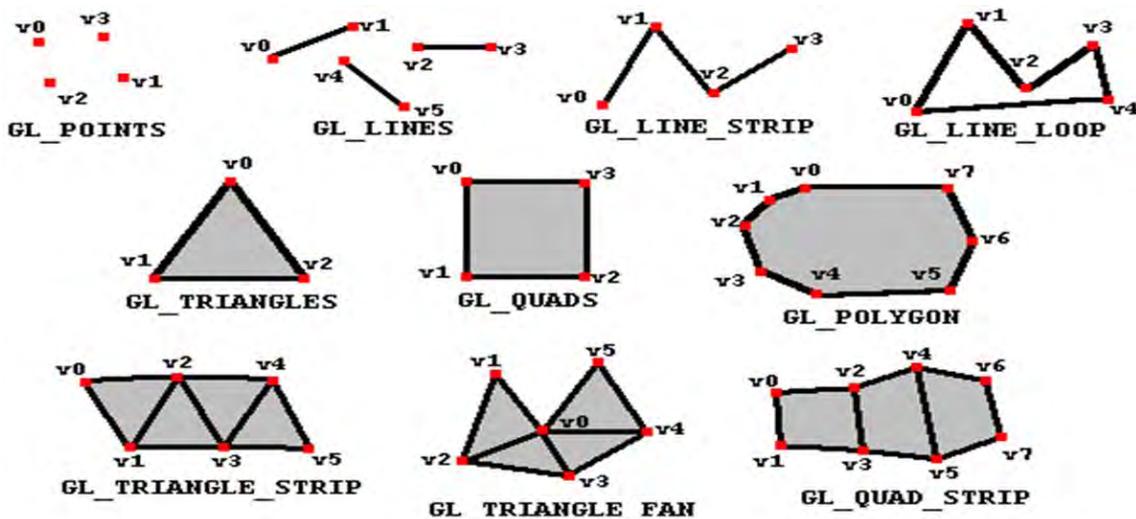


Fig. 3.1. Geometrías primitivas de OpenGL.

3.2 FORTRAN

Por otro lado, FORTRAN es un lenguaje de programación desarrollado por IBM desde el año de 1954 tratando de solucionar problemas en la computación de aquella época en cuanto a los costos en la cantidad de programadores en un sistema de cómputo, que incluso llegaba a superar la cantidad del costo de la computadora, y además que el tiempo de uso del ordenador consistía entre el 25% y el 50% en depuración y programación. Lo que se buscaba con el compilador de FORTRAN era obtener un código eficiente [12]. Después de su aparición siguieron nuevas versiones que, generalmente FORTRAN, se especializaron en ser un lenguaje de programación centralizado en matemáticas y matemáticas aplicadas a las ciencias e ingeniería. Para RELAP/SCDAPSIM 3.4, la versión FOTRAN 77 funge como un programa la solución de métodos numéricos.

3.3 Figuras de los componentes SCDAP

Gran parte de la información que proporciona RELAP/SCDAPSIM 3.4 después de la simulación resulta difícil de manejar o de interpretar, pues no se logra distinguir con claridad cuáles son las causas que provocan algunos efectos, ya que a veces se consideran bastantes componentes en una simulación resultando muchas variables a analizar. Tratándose del tema de daño severo a los componentes del núcleo, a SCDAP se le ha implementado un sistema de visualización de sus componentes como barras de combustible, barras calentadas eléctricamente, barras de control, componente BWR (blade/box) y revestimientos (shroud).

Los componentes SCDAP están comprometidos a dos componentes, axial y radial [13], por lo que una visualización en 2D resulta útil para su representación usando bibliotecas de OpenGL. Para la creación de los despliegues, es necesario definir la geometría de los componentes en la visualización en pantalla.

A modo de ejemplo, para el caso de las barras ya sean de combustible, calentadas eléctricamente o control, la malla de nodalización está constituida de la componente radial y axial, ya que se modelan mediante coordenadas cilíndricas estos componentes, con una separación nodal de Δr y Δz , respectivamente a cada componente espacial. Dicha nodalización es la que los usuarios determinan en el *input file*. En la Figura 3.2 se aprecia un aspecto representativo de la nodalización del componente SCDAP, donde el subíndice en r y z es el número de nodo radial y axial, respectivamente, R es el nodo asociado.

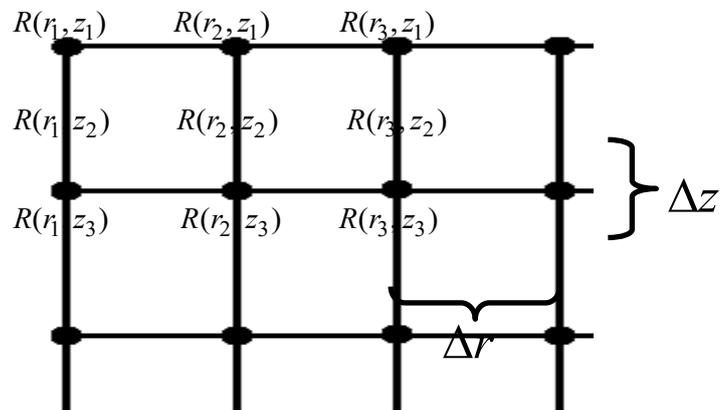


Fig. 3.2. Representación de la nodalización en coordenadas cilíndricas.

Para trasladar la visualización de los nodos de SCDAP en OpenGL, se hace lectura de los nodos en el código usando el argumento *GL_POLYGON* que admite dibujar

polígonos, ver Figura 3.1, en la función *glBegin ()*. Esta función permite dibujar figuras dependiendo del tipo de argumento ya sean líneas, puntos, líneas interconectadas, etc . Para determinación de los vértices o nodos en el espacio de la pantalla se usa la función *glVertex3f()*, donde el número 3 nos dice que trabaja en el campo tridimensional y la letra *f*, que acepta números flotantes, esto quiere decir que acepta números en notación científica de gran magnitud como extremadamente pequeños con excelente precisión. Esta función requiere de tres argumentos para representar un punto en el espacio, el primer argumento es para la coordenada en *x*, el segundo en *y* y último en *z*. Y, para cerrar la instrucción de la creación de la figura se usa la función *glEnd()*, sin ningún argumento. En la Figura 3.3 se presenta la estructura para generar un triángulo. En la función *glVertex3f()* consta de tres argumentos que para los componentes de SCDAP solo usan los dos primeros componentes para trabajar sobre el campo de 2D, *x* y *y*. Esta misma lógica se extrapola para los demás componentes SCDAP para la localización de los nodos y creación de la forma en OpenGL.

```
glBegin (GL_POLYGON) ;  
glVertex3f (x1, y1, z1) ;  
glVertex3f (x2, y2, z2) ;  
glVertex3f (x3, y3, z3) ;  
glEnd () ;
```

Fig. 3.3. Creación de un triángulo en OpenGL.

3.4 Distribución de colores en componentes SCDAP

Mediante una escala de colores se puede establecer la distribución de colores en los componentes SCDAP [14] dependiendo la magnitud de la variable que se desea

mostrar. Para crear la escala se hace uso de las funciones de FORTRAN *maxval()* y *minval()*, los cuales permiten encontrar el valor máximo y mínimo, respectivamente, de la variable que se encuentre dentro del paréntesis. Una vez que se define el valor máximo y mínimo de la variable, la escala se secciona en cinco niveles para introducir la distribución de colores. Para agregar colores a la figura que representa la escala se usa la función *glColor3f()*, y tiene como argumento tres variables que dan como resultado la selección de colores en combinación de rojo, verde y azul. En la Tabla 3.1, se muestran los argumentos como números reales en la función *glColor3f* y operan de 0 a 1.0, dando así la posibilidad de crear todos los colores en el espectro visible con la variación y combinación de los argumentos. Para asignarles color a las figuras, el color se le asocia a sus vértices, antes de escribir la posición del vértice se selecciona el color, puede ser un color sólido o difuminado. Este último se genera usando la función *glShadeModel()* con el argumento *GL_SMOOTH*, lo cual llenará el polígono interpolando colores que haya en cada uno de sus vértices. Un ejemplo de todo lo anterior se muestra en la Figura 3.4.

Tabla 3.1. Representación de colores con *glColor3f*.

<i>glColor3f</i> (rojo,verde,azul)	$0 \leq \text{rojo,verde,azul} \leq 1.0$
Argumento	Color obtenido
<i>glColor3f</i> (1.0,0.0,0.0)	Rojo
<i>glColor3f</i> (0.0,1.0,0.0)	Verde
<i>glColor3f</i> (0.0,0.0,1.0)	Azul
<i>glColor3f</i> (0.0,0.0,0.0)	Negro
<i>glColor3f</i> (1.0,1.0,1.0)	Blanco
<i>glColor3f</i> (1.0,1.0,0.0)	Amarillo
<i>glColor3f</i> (1.0,0.0,1.0)	Magenta

```

glShadeModel(GL_SMOOTH);
glBegin(GL_POLYGON);
glColor3f(0.0, 0.0, 1.0); /* blue */
glVertex3f(0.0, 0.0, 0.0);
glColor3f(0.0, 1.0, 0.0); /* green */
glVertex3f(200.0, 200.0, 0.0);
glColor3f(1.0, 0.0, 0.0); /* red */
glVertex3f(20.0, 200.0, 0.0);
glEnd();
glFlush();

```

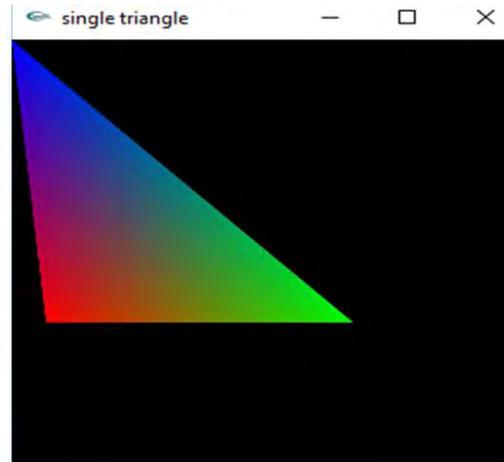


Fig. 3.4. Polígono trazado con OpenGL usando las funciones *glBegin* y *glShadeModel*.

Con el mismo principio con el que se creó el triángulo de la Figura 3.4, se genera la barra de la escala en la variación de colores que se asocia a la variable que se desea mostrar entre el valor mínimo y el valor máximo durante la simulación con cinco secciones, Figura 3.5. Como no se puede determinar cual será el valor mínimo y máximo en toda la simulación se hace el cálculo de esos valores para cada paso de integración temporal y los valores de la escala varían dependiendo de ello.

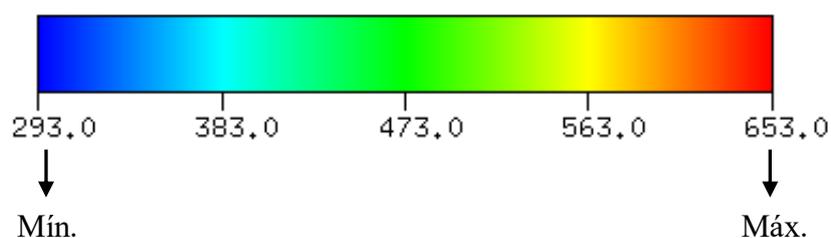


Fig. 3.5. Barra de distribución de colores dependiendo la temperatura.

Durante la lectura de la posición de los nodos en OpenGL a cada nodo de los componentes SCDAP se les asigna un color que varía con respecto a la escala, desplegando el componente en diferentes colores. Los colores se obtienen dando la variación dentro de la escala. Ejemplificando la variación de la temperatura y la

variación del color amarillo a rojo, siempre que la temperatura de un nodo quede en medio de dos valores de la escala se variará el color del nodo entre ese rango., se tiene:

T = Temperatura del Nodo

T_1 = Temperatura en la escala

T_2 = Temperatura en la escala

$T_2 > T_1$

$T_2 > T > T_1$

$$color = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}, \text{ glColor3f}(1.0, color, 0.0)$$

Lo anterior es utilizado para variables de temperatura y producción de hidrógeno. Sin embargo, para considerar la variable de daño se usan cajas con leyendas que están ligadas a un color, color que será mostrado por los componentes dependiendo su estatus. De las cajas mostradas en la Figura 3.6, se entienden los niveles de daño de cómo se menciona en las Tablas 3.2 y 3.3.

Tabla 3.2. *Damage Level (Rods)* (nivel de daño de barras).

Geometría Intacta (azul).	El volumen del componente no tiene ningún daño en su estructura.
Ruptura debido a hinchazón (azul claro).	Se presenta ruptura debido a la hinchazón en el revestimiento de las barras.
Escombros (verde).	Se empiezan a fragmentar los componentes de las barras.
Escombros cohesivos (amarillo).	Coexistencia de elementos cohesivos y fundidos.
Piscina de fundición (rojo).	Estado fundido de todos los componentes en el volumen.

Tabla 3.3. *Damage Level (BWR blade/box)* (nivel de daño componente laminar BWR (blade/box)).

Geometría Intacta (azul).	El volumen del componente no tiene ningún daño en su estructura.
Recolocación del Segmento 1 de la caja (verde).	Segmento 1 de la caja cambia de posición debido a fundición.
Recolocación del Segmento 2 de la caja (amarillo).	Segmento 2 de la caja cambia de posición debido a fundición.
Recolocación de ambos Segmentos de la caja (rojo).	Segmento 1 y 2 de la caja cambian de posición debido a fundición.

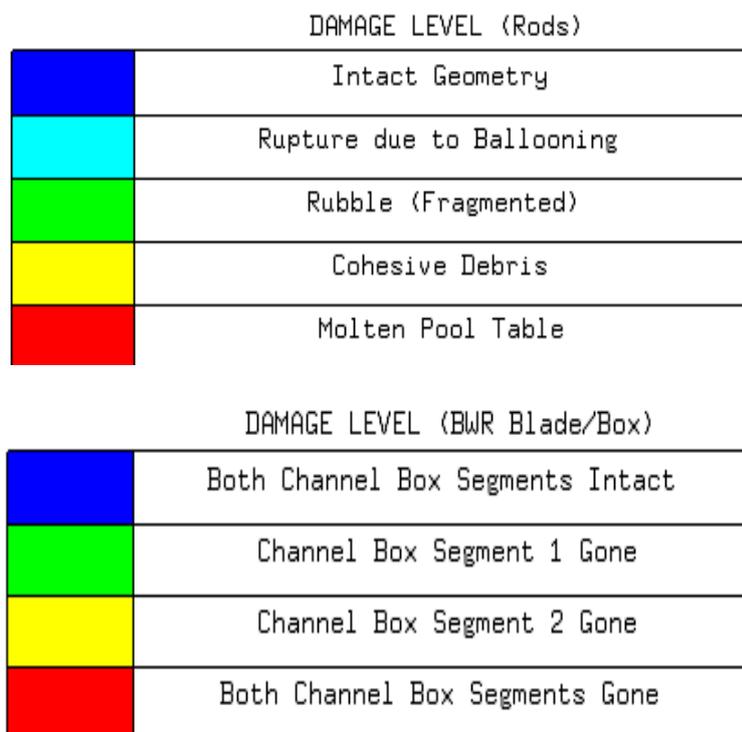


Fig. 3.6. Cajas de nivel de daño.

Para entender mejor la Tabla 3.3, el modelo del componente laminar BWR (blade/box) está conformado por dos secciones, debido a que hay un segmento en que la componente BWR (channel box) no tiene contacto con la componente BWR (blade sheath) a este se le designa como segmento 2, y donde se encuentra adyacente la BWR (channel box) a la BWR (blade sheath) se denomina segmento 1, como se observa en la Figura 3.7.

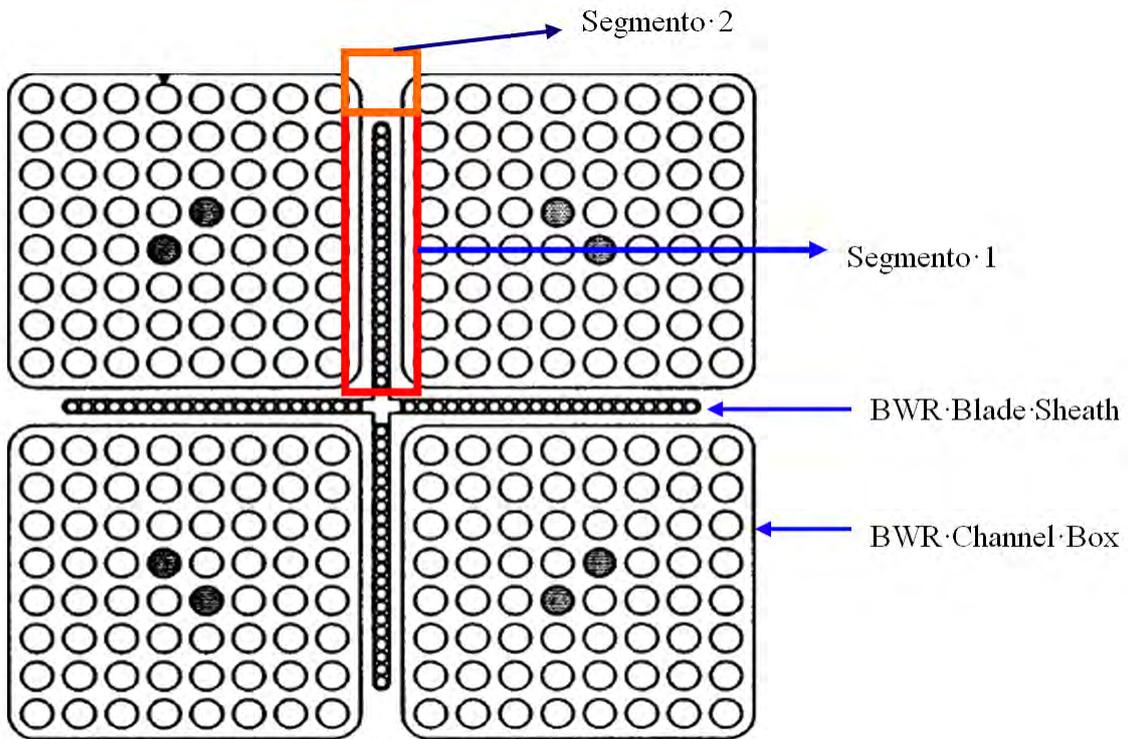


Fig. 3.7. Configuración de ensambles de combustible en un BWR.

En la Figura 3.8, está un diagrama de bloques para la generación de los despliegues.

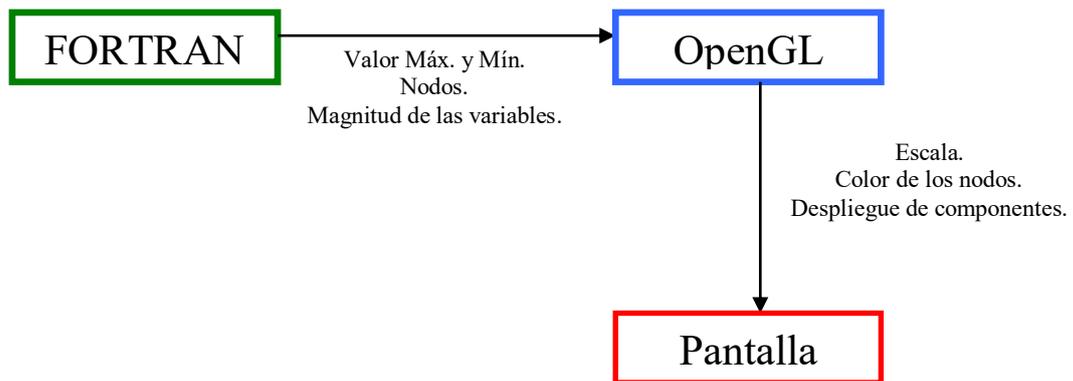


Fig. 3.8. Diagrama de bloques para la generación de despliegues.

En la Figura 3.9 se muestran los componentes SCDAP generados por OpenGL.

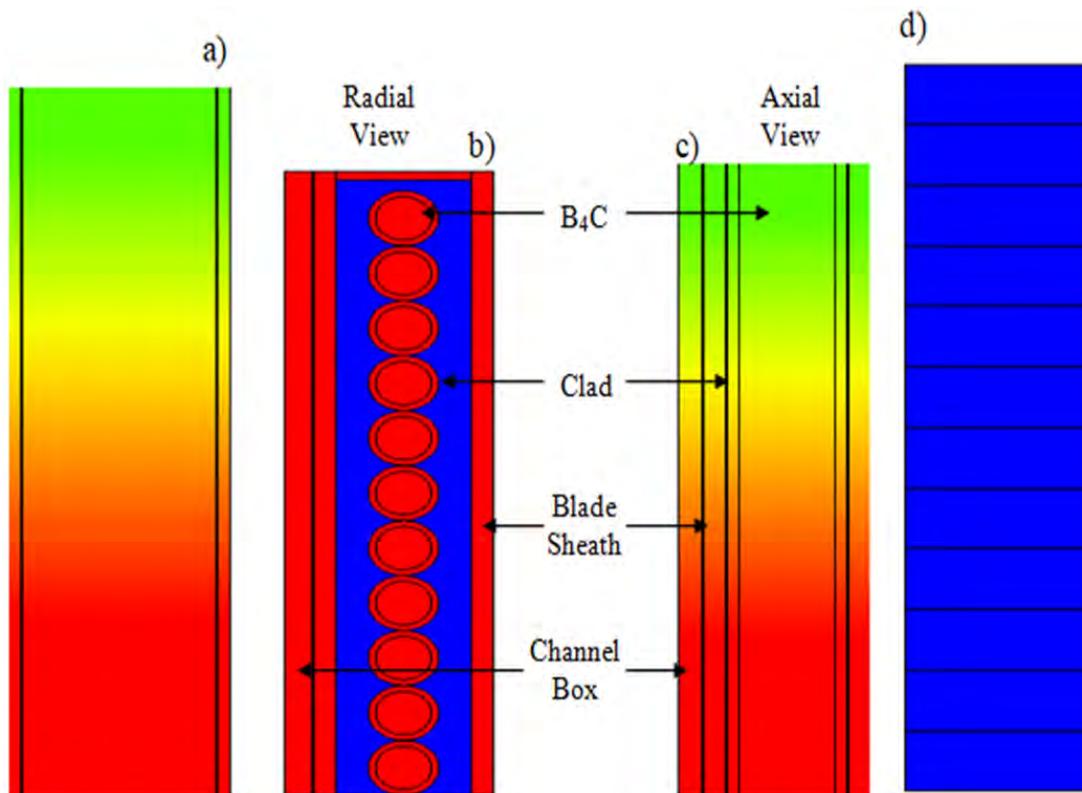


Fig. 3.9. Variación de colores dependiendo la magnitud de la temperatura de diferentes componentes SCDAP. Bajo una escala de colores a) Corresponde a la vista axial para barra de combustible, barra calentada eléctricamente y barra de control, b) corresponde a la vista radial del componente BWR (blade/box), donde el color corresponde al máximo valor dependiendo de la variación de la vista axial, c) va acoplada conjuntamente con la vista radial, en este caso se muestra la variación axial de la propiedad en cuestión. Tanto b) como c) se presenta simultáneamente. d) es el revestimiento (componente *Shroud*), donde las líneas horizontales corresponden al posicionamiento de los nodos axiales.

3.5 Interfaz Gráfica en RELAP/SCDAPSIM 3.4

Cuando se inicia la ejecución del código se muestran varios despliegues. La primera ventana muestra una representación hidrodinámica nodal del sistema a simular, Figura 3.10.

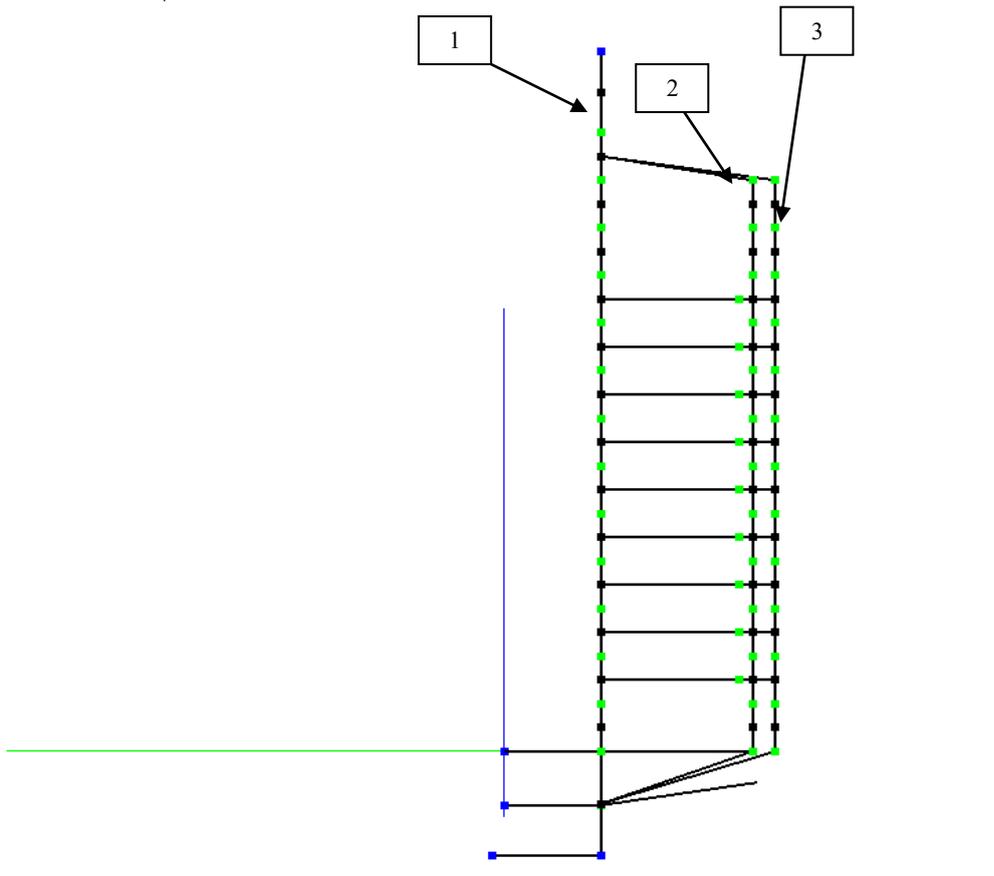


Fig. 3.10. Sistema hidrodinámico de CORA 17 mostrado por la interfaz de RELAP/SCDAPSIM 3.4.

La Figura 3.10, muestra la representación de los componentes hidrodinámicos de CORA 17, están señaladas 3 columnas, donde la columna 1 representa la región hidrodinámica asociada a las barras de combustible y calentada eléctricamente (volumen 110), la columna 2 a la región intersticial (volumen 120) y la columna 3 a la región anular del sistema (volumen 130), como se mencionó en la sección 2.5. Estos números, mostrados en recuadros, no aparecen en la pantalla. Los puntos azules representan volúmenes fuente para controlar las condiciones de frontera, los puntos negros son los nodos de los volúmenes y los puntos verdes son las uniones. No se profundiza sobre este tipo de visualización hidrodinámica debido a que aún no proporciona información suficiente o manejable.

A continuación, para seleccionar la nueva interfaz desarrollada a partir de la primera pantalla se siguen los siguientes pasos mostrados en las Figuras 3.11 y 3.12.

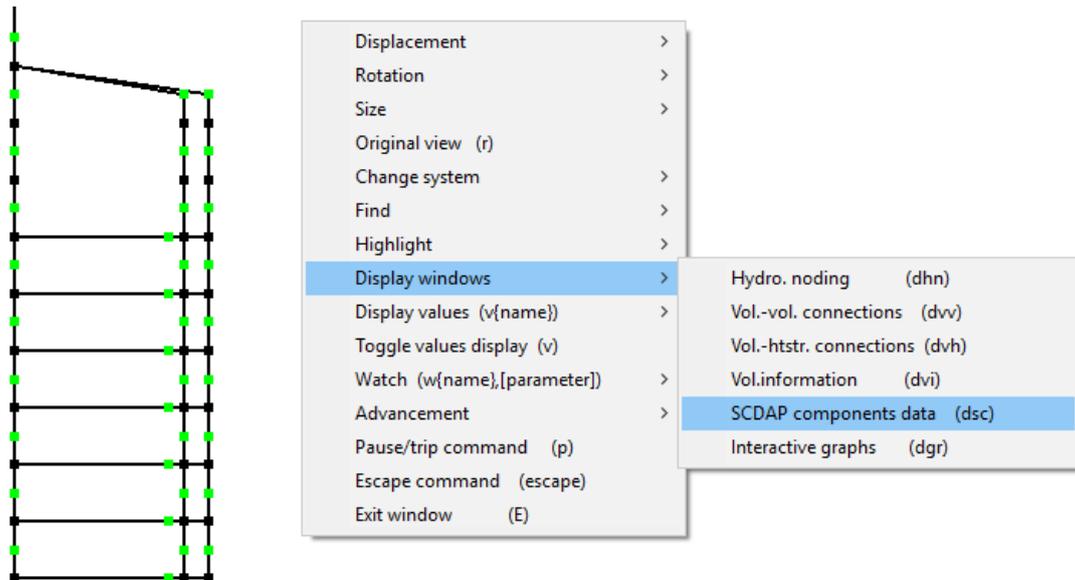


Fig. 3.11. Menú principal de RELAP/SDCAPSIM 3.4. Se selecciona con clic derecho la pantalla. Posteriormente, la opción “Display Windows” con clic izquierdo y se selecciona “SCDAP components data”.

De los pasos mostrados en la Figura 3.11, se genera una nueva pantalla en blanco en la cual, dando clic derecho se despliega otro menú y, siguiendo los pasos mostrados en la Figura 3.12, se distinguen las opciones que hay para ser representadas en los componentes SCDAP de la nueva interfaz que son: temperatura, generación de hidrógeno y nivel de daño.

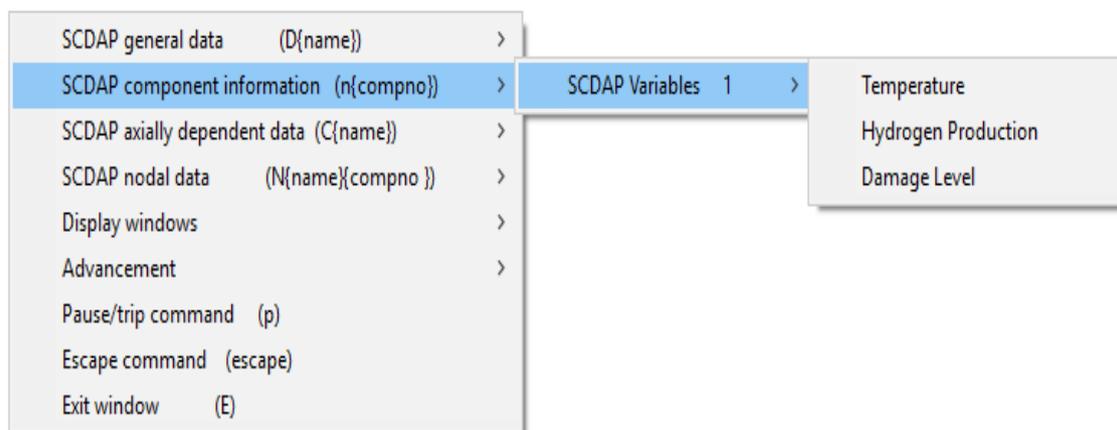


Fig. 3.12. Menú para la selección de propiedades a mostrar en pantalla.

En las Figuras 3.13-3.15 se muestran algunos ejemplos de diferentes simulaciones, mostrando la capacidad del nuevo aditamento en RELAP/SDCAPSIM 3.4.

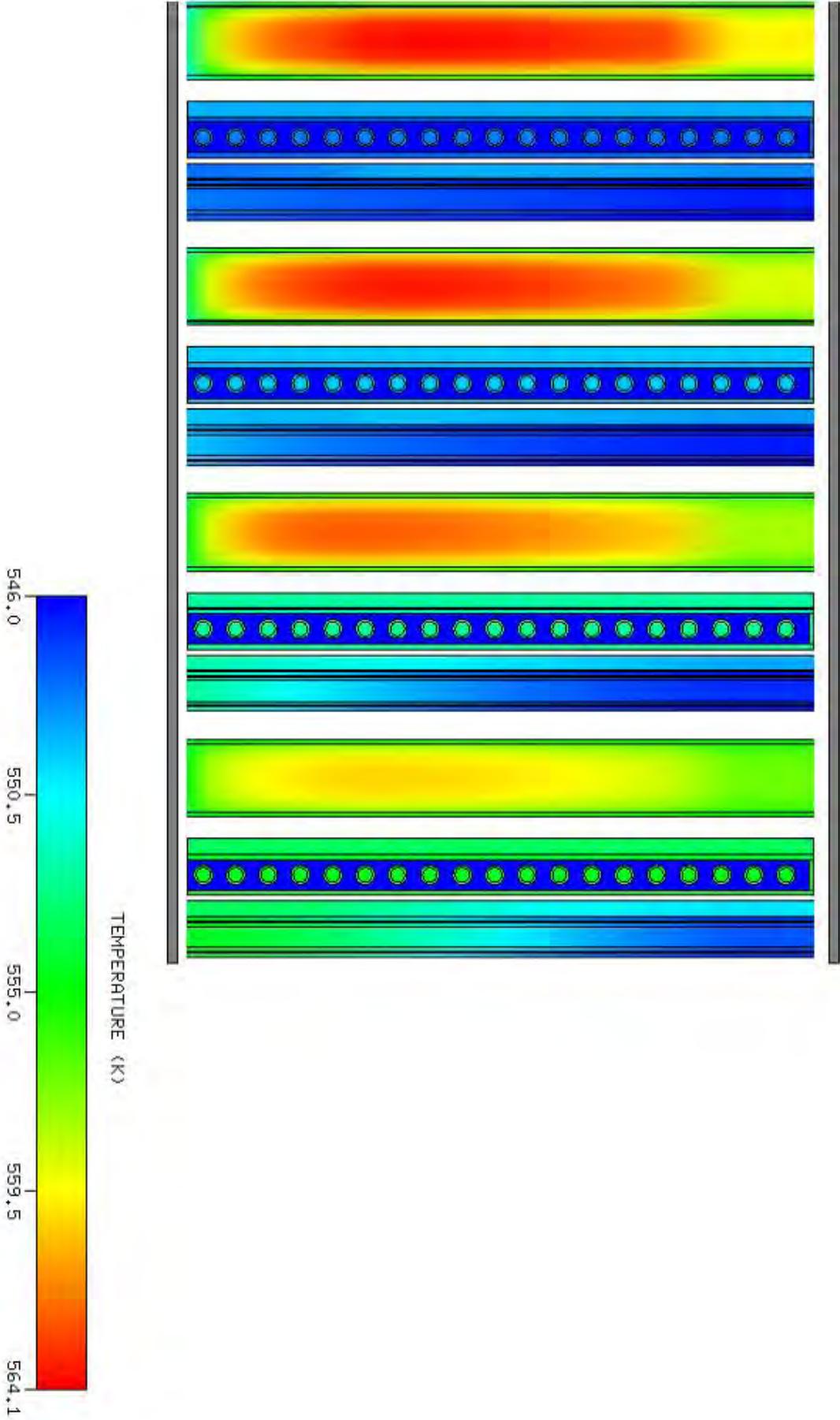


Fig. 3.13. Variación de temperatura de un reactor del tipo BWR.

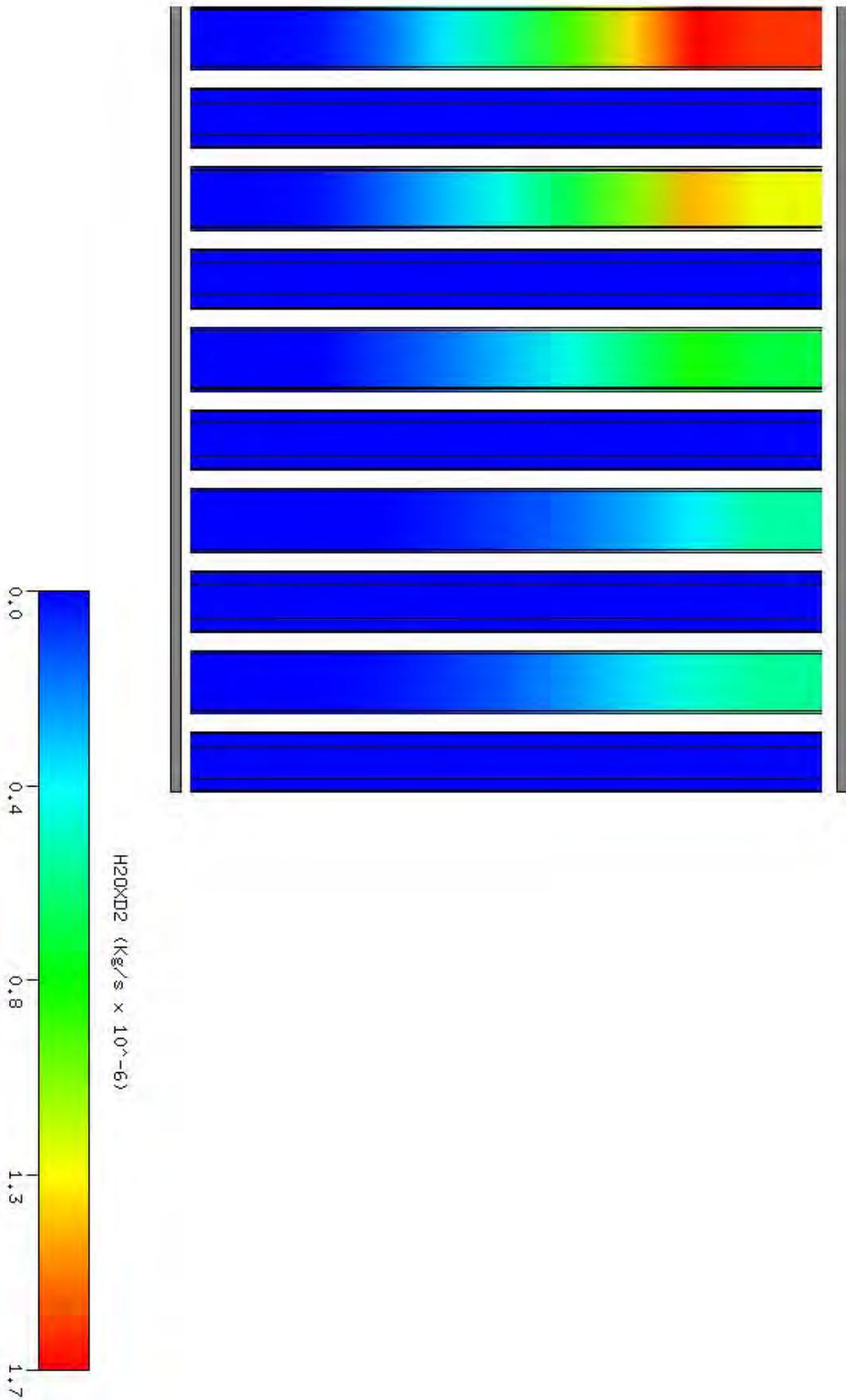


Fig. 3.14. Variación en la generación de hidrógeno en un reactor nuclear de PWR.

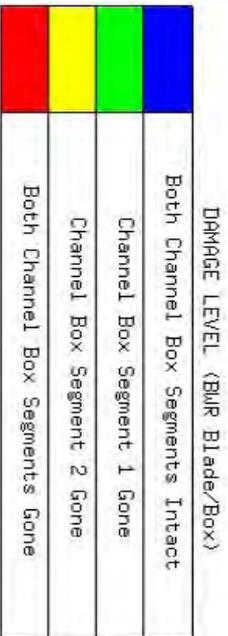
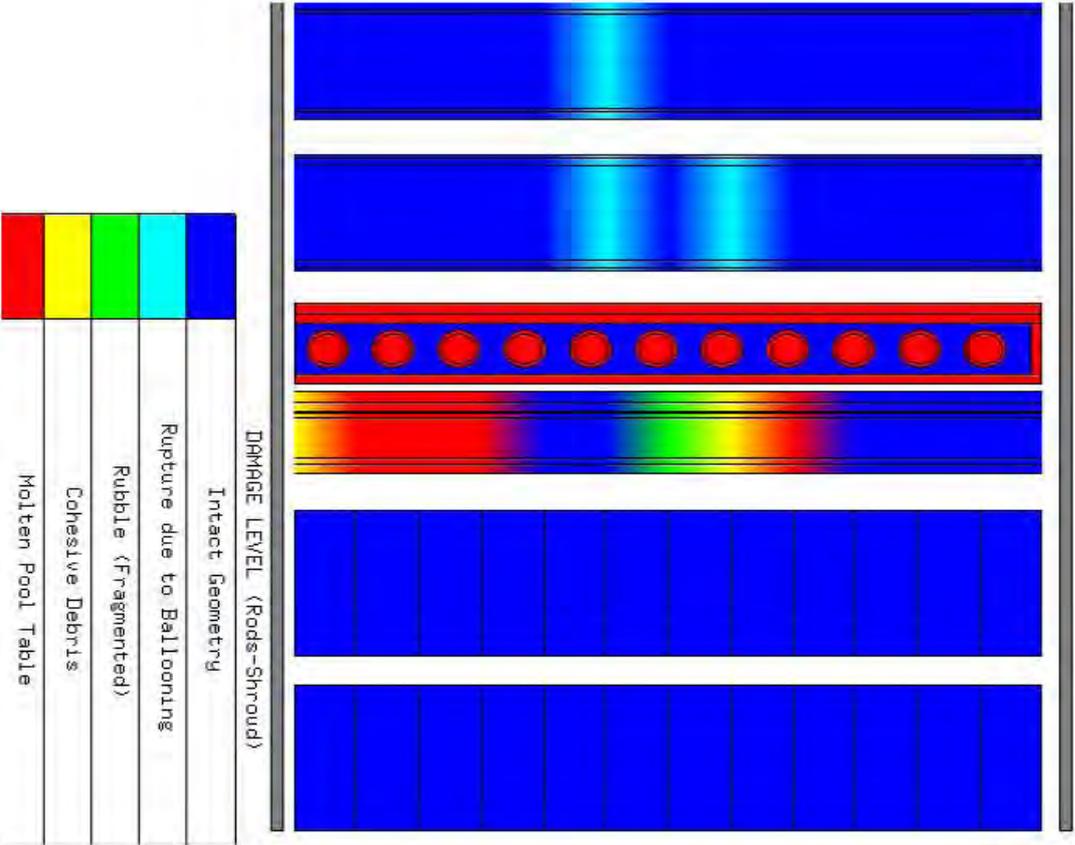


Fig. 3.15. Nivel de daño en el experimento CORA-18.

De las Figuras 3.13-3.15, el orden en el que aparecen los componentes en pantalla es el mismo orden en el que están en el *input file*. La Figura 3.13, es la representación del campo de temperaturas en los componentes SCDAP del *input file* de un reactor nuclear del tipo BWR. Como se observa, con base en el *input file* se cuenta con una barra de combustible seguida de un componente BWR (blade/box), de izquierda a derecha. Estos componentes representan una barra de combustible y un componente BWR (blade/box) ambos promedio en diferentes regiones radiales del núcleo, esto quiere decir que el primer par de estos componentes representan la región central del núcleo, cada par se distribuye hacia la periferia, dando así 4 regiones en el núcleo. La Figura 3.14 es un caso similar al de la Figura 3.13 pero en este caso mostrando la producción de hidrógeno en los nodos axiales en un reactor tipo PWR (Pressurized Water Reactor), que con base en el *input file* se tiene una barra de combustible seguida de una barra de control por región del núcleo, de izquierda a derecha, dando lugar a 5 regiones del núcleo. La Figura 3.15 es una representación del experimento CORA-18, donde el primero componente, de izquierda a derecha, es una barra de combustible, el siguiente es una barra calentada eléctricamente, un componente BWR (blade/box), el revestimiento (shroud) del ensamble y un revestimiento de aislamiento del sistema. Lo que se reporta es el nivel de daño en los componentes.

Hasta el momento se han implementado 3 propiedades SCDAP para mostrar en los despliegues; temperatura, generación de hidrógeno y nivel de daño. Esta herramienta con estos despliegues facilita el análisis de CORA-17 en esta tesis, y en general para los usuarios del código.

3.6 Pleno Inferior

Un aditamento extra, pues no será usado para el análisis de CORA-17 pero sí para efectos de información en el progreso de RELAP/SCDAPSIM 3.4 y el análisis posterior, es la identificación de temperaturas en el pleno inferior. Con anterioridad no se contaba con la especificación de la temperatura en él, solo se mostraban variaciones de rojo cuando los elementos del núcleo se habían fundido y se recolocaban en las paredes del pleno inferior. Ahora, siguiendo la misma metodología usada para los componentes SCDAP se genera la termografía para el pleno inferior. A diferencia de la barra de distribución de colores asociada a la temperatura para los componentes SCDAP que cambia en función de la temperatura, esta vez la barra se mantiene fija en diferentes escalas, escalas que cambian cuando la temperatura máxima en el pleno inferior excede el valor máximo de la barra y reescala sus valores automáticamente, además de que la barra señala entre qué valores, mínimo y máximo, se encuentran las temperaturas en el pleno inferior para visualizar en qué segmento de temperaturas se trabaja. Un ejemplo de la barra se encuentra en la Figura 3.16.

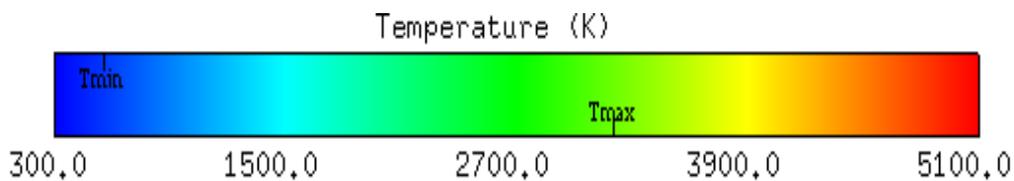


Fig. 3.16. Barra de temperaturas señalando la mínima y máxima temperatura en el pleno inferior.

Para acceder a la representación del pleno inferior se realiza el mismo procedimiento como se muestra en la Figura 3.11. Sin embargo, en este caso se muestra la opción

“Couple Noding”, la cual dirige directamente a la visualización del pleno inferior, Figura 3.17.

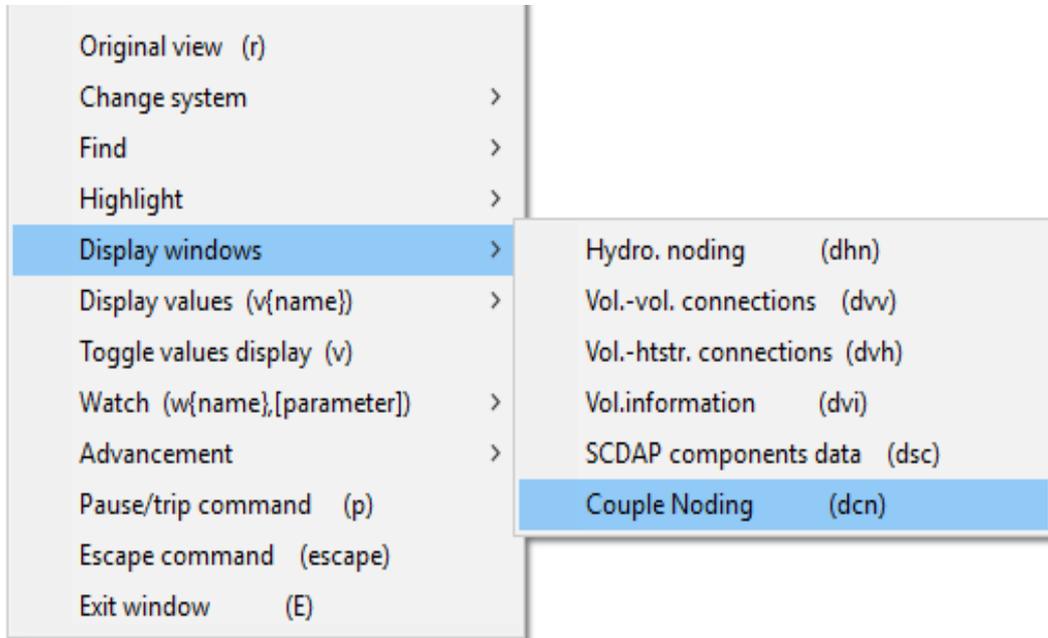


Fig. 3.17. Selección de la visualización del pleno inferior.

La Figura 3.18 es un ejemplo de la visualización del pleno inferior mostrando la mitad de la semi-esfera. Las temperaturas que ahí se encuentran son de los elementos recolocados después de la fundición del núcleo. De la Figura 3.18, la nodalización del pleno inferior está dada por los puntos amarillos los cuales ofrecen la información de la temperatura y a los que se les asigna el color en función de ésta. Con esta nueva visualización es posible observar con mayor facilidad la temperatura de los elementos recolocados, ya que ahora es viable determinar mediante el color el valor de dicha variable.

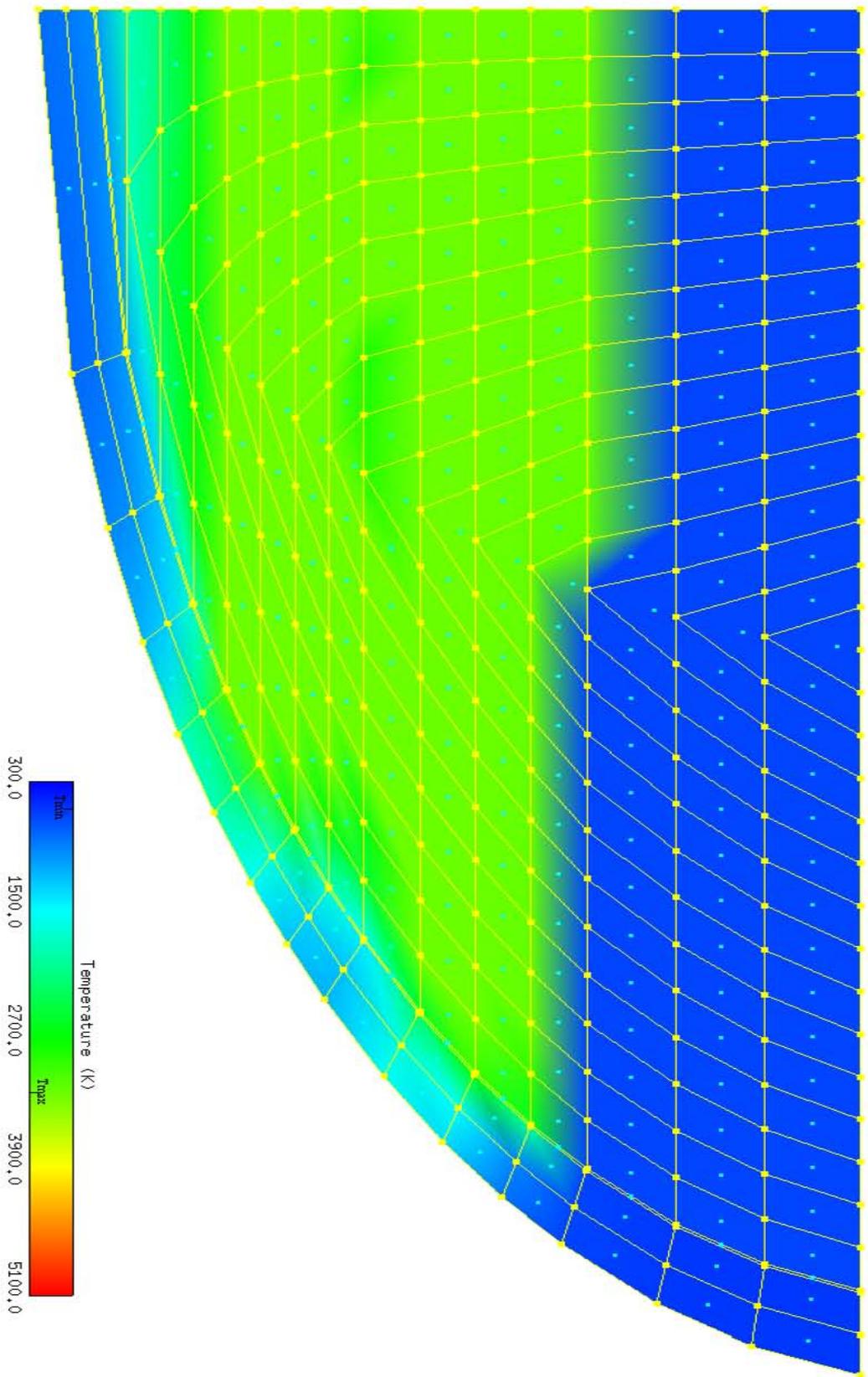


Fig. 3.18. Pleno inferior con material fundido recolocado.

En el siguiente capítulo se analiza el comportamiento del experimento CORA-17 con base en esta nueva herramienta añadida al código RELAP/SCDAPSIM 3.4. Además de su comparación con de los resultados obtenidos por el código y los reportados en el informe del KIT.

Capítulo 4

4.0 Análisis de resultados en CORA 17 en RELAP/SCDAPSIM 3.4

Con la herramienta de visualización de los componentes SCDAP descrita en el capítulo anterior se analiza en este capítulo la simulación del experimento CORA 17 con RELAP/SCDAPSIM 3.4 lo que permite mayor flexibilidad y facilidad de interpretación de los fenómenos ocurridos durante la experimentación, comparando resultados obtenidos en el código con los reportados por KIT, y además provee información sobre la depuración del código para su validación y sugerencias que se ofrecen a ISS (Innovative Systems Software) para la mejora del código. Los efectos que se ven involucrados en CORA-17 son: la reacción exotérmica por la generación de hidrógeno en componentes con Zircaloy, acero inoxidable y B₄C, daño en los componentes y la variación de la temperatura, los cuales se analizan a continuación.

4.1 Reacción de Oxidación

En el capítulo 1 se presentó la descripción del experimento CORA 17 y las especificaciones del mismo. El capítulo 2, aborda la implementación del experimento en el código RELAP/SCDAPSIM 3.4. En el tercer capítulo, se introduce una nueva herramienta de visualización de componentes SCDAP y COUPLE en el código, que permite un análisis más sencillo, ya que es posible observar el comportamiento de las simulaciones de una manera versátil en tiempo real. Antes de empezar con el análisis es necesario tener en cuenta fenómenos importantes que ocurren durante la experimentación, los cuales son; la fundición de los elementos inmersos en el ensamble, lo que se traduce como la temperatura de fundición y la reacción exotérmica de los materiales con Zircaloy, acero inoxidable y B₄C debido a su oxidación con vapor de agua.

Partiendo de los elementos que se oxidan durante el experimento. Hay componentes en el ensamble que, debido a sus materiales, la temperatura y a la interacción con vapor de agua tienden a oxidarse resultando un incremento en su temperatura. En el caso de CORA 17 se reúnen estos elementos para este escenario de oxidación, mostrando un incremento de temperatura en la parte inferior del ensamble una vez que empieza el enfriamiento súbito, ya que el agua para el enfriamiento se inserta en la parte inferior del ensamble, con una respuesta bastante rápida en la interacción. Debido a esta reacción se libera energía, debido a la reacción exotérmica, así como hidrógeno. Con base en el experimento llevado a cabo por KIT, se reporta que gran parte de la producción de energía e hidrógeno es gracias a la reacción de oxidación que es causada por el B₄C contenido en el componente laminar BWR (blade/box), ya que al reaccionar

con el vapor que se genera por el calentamiento del agua que fue añadida en el proceso de enfriamiento, dicho componente es recolocado debido a su fundición. La producción de hidrógeno por un gramo de B_4C es 6 veces mayor que la producida por el Zircaloy [15], lo que sugiere un aumento en la temperatura considerable. El daño después del experimento se muestra en la Figura 4.1.

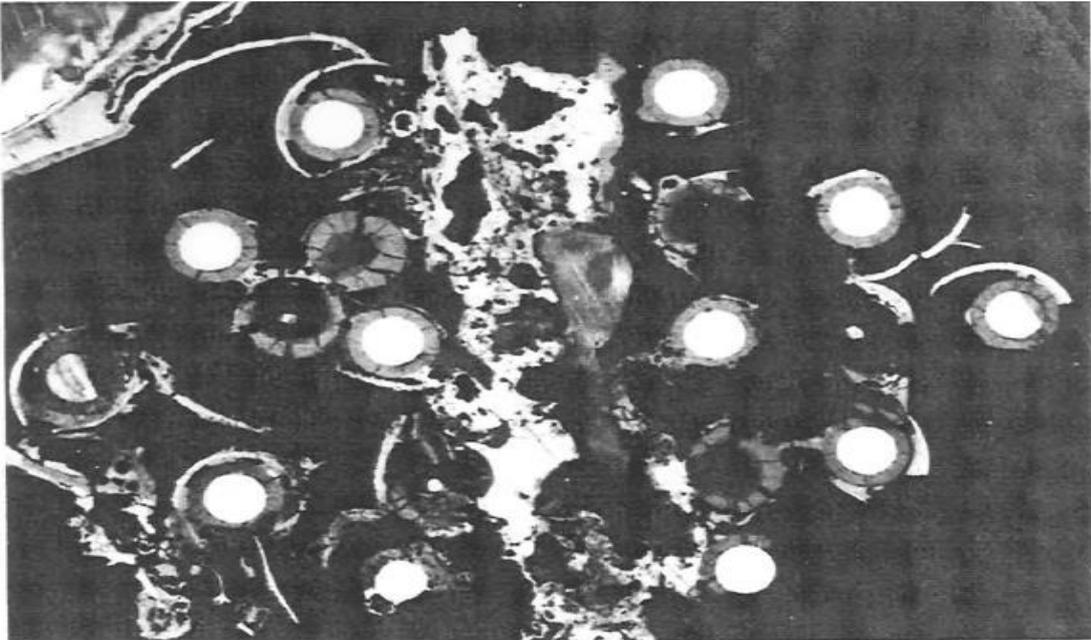


Fig. 4.1. Fotografía de la sección transversal del ensamble de CORA 17 después del experimento [16].

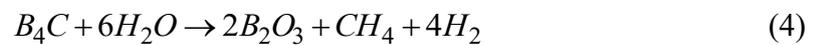
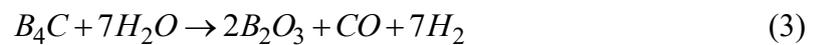
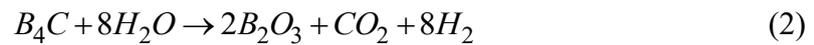
Las barras sin calentar y calientes no muestran un daño significativo, sólo se observa daño en los revestimientos de las barras, comparado con la desaparición del componente laminar BWR (blade/box).

Tanto el Zircaloy como el B_4C , tienen reacciones de oxidación, sin embargo el B_4C es más exotérmico y produce más hidrógeno por gramo de material que el Zircaloy. Las ecuaciones estequiométricas de oxidación están dadas por [17]:

Ecuación de oxidación del Zircaloy,

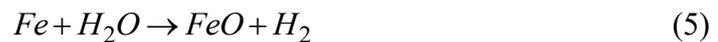


Ecuaciones de oxidación del B₄C,



El experimento realizado por KIT sugiere que las ecuaciones más probables de reacción son las ecuaciones 1, 2 y 4. Sin embargo, el código RELAP/SCDAPSIM 3.4 solo considera las ecuaciones de reacción 1 y 3 lo que es un indicio para que los resultados entre el código y el experimento no tengan una similitud, [18], [19].

Otra de las reacciones de oxidación que considera el código RELAP/SCDAPSIM 3.4 es la oxidación del acero inoxidable produciendo hidrógeno y la ecuación química descrita en el código para dicho proceso es la siguiente:



Los modelos que resuelve el código para la oxidación de los materiales antes mencionados, calculan la generación de calor y la producción de hidrógeno. Estos modelos acoplan las ecuaciones de velocidad de oxidación con las temperaturas de

los materiales provenientes de la ecuación de transferencia de calor de cada componente [20].

Para determinar la oxidación del material se sigue la siguiente ecuación parabólica, nombrada de esta manera debido a la solución de δ ,

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{A}{\delta} e^{\left(\frac{-B}{T}\right)} \quad (6)$$

Donde δ corresponde a la ganancia de peso o espesor de oxidación (kg/m^2 o m). Esta dualidad de unidades se debe a que para el Zircaloy se resuelven 3 ecuaciones parabólicas; una para la ganancia de peso de oxígeno, otras dos para el crecimiento de las capas ZrO_2 y αZrO_2 , donde esta última es un cambio en la microestructura del ZrO_2 [21], para los demás materiales solo se considera la ganancia en peso de oxígeno. T es la temperatura (K), t es el tiempo (s), A , B , son constantes tomadas directamente de un conjunto de subrutinas donde se almacenan las propiedades de los materiales para los componentes en RELAP/SCDAPSIM 3.4.

A partir de la solución de la ecuación 6, se calcula la cantidad de calor generado por la oxidación. Sabiendo la cantidad de oxígeno formado, la cantidad de energía liberada es,

$$Q_{ox} = \frac{M}{M_{(\text{O}_2)}} h_r S \frac{dw}{dt} \quad (7)$$

donde $M_{(O_2)}$ es el peso molecular del oxígeno, M es la masa molecular del material oxidado, h_r es la energía liberada por reacción (J/kg), S es el área original de superficie oxidada (m^2) antes de cualquier efecto de deformación u oxidación, w es la ganancia en peso por unidad de superficie de oxígeno (kg/m^2).

Los modelos para la tasa de producción de hidrógeno y el vapor removido por la reacción muestran de nuevo una dependencia de la cantidad de la ganancia en peso de oxígeno como se muestra a continuación,

$$\dot{H}_2 = \frac{1}{8} S \frac{dw}{dt} \quad (8)$$

$$\dot{H}_2O = \frac{9}{8} S \frac{dw}{dt} \quad (9)$$

Los componentes en su oxidación tienen tres condiciones para dejar de considerar la reacción:

La primera condición es cuando todo el material del componente ha sido totalmente oxidado. Para el caso del acero inoxidable cuando se convierte en FeO . Por lo que el límite de reacción viene dado por,

$$w \leq \frac{M_{O_2}}{M} \rho \frac{V}{S} \quad (10)$$

donde M_{O_2} es el peso molecular del oxígeno, M es el peso molecular, ρ es la densidad y V es el volumen del material.

La segunda condición es la disponibilidad del vapor de agua,

$$\frac{dw}{dt} = \frac{8}{9} \dot{m} \quad (11)$$

donde \dot{m} , es el flujo de vapor disponible para la reacción de oxidación superficial.

La tercera y última condición de oxidación es la difusión del flujo de la masa molar del vapor de agua, que está dada por la presión parcial del vapor y es escrita como,

$$\frac{N_{(H_2O)}}{A} = B_{(H_2O)} P_{(H_2O)} \quad (12)$$

donde $N_{(H_2O)}$ es el flujo de masa molar (kg-mole/s), $B_{(H_2O)}$ es el coeficiente de transferencia de masa (kg-mol/(s m²Pa)), A es el área de la superficie (m²) y $P_{(H_2O)}$, es la presión parcial del vapor de agua (Pa).

Un factor importante para llevar a cabo la reacción de oxidación es que se cumpla con la temperatura dada para cada material. En la Tabla 4.1 se detallan las temperaturas de reacción para cada material.

Tabla 4.1. Temperaturas de oxidación.

<i>Acero Inoxidable</i>	La oxidación empieza cerca de la temperatura de fundición, $T \approx 1723\text{ K}$.
B_4C	La reacción se considera a partir de $T > 1700\text{ K}$
<i>Zircaloy</i>	Para $1853\text{ K} > T > 923\text{ K}$ se considera la generación de la capa de óxido (ZrO_2). $T > 1853\text{ K}$, hay reacción acelerada debido al cambio en la microestructura αZrO_2

Otro de los aspectos de importancia para la simulación del experimento CORA 17, es tener presente la temperatura de fundición de los materiales. En la Tabla 4.2, se muestran las temperaturas de fundición de los mismos.

Tabla 4.2. Temperaturas de fundición.

Temperatura	Evento
$T > 1723\text{ K}$	Fundición de acero inoxidable e Inconel.
$T > 2033\text{ K}$	Fundición del Zircaloy-4
$T > 2623\text{ K}$	Fundición del B_4C
$T > 2963\text{ K}$	Fundición de ZrO_2
$T > 3123\text{ K}$	Fundición de UO_2

4.2 Análisis de CORA-17 con RELAP/SCDAPSIM 3.4

La simulación del CORA-17 se llevo a cabo mediante un barrido de diferentes pasos de integración temporal hasta obtener resultados que se ajustaran lo más posible con los valores reportados en el experimento donde se obtuvieron diferentes intervalos de pasos de integración para diferentes intervalos de tiempo: para el intervalo 3000 s a

5000 s se especificaron $dt_m = 1 \times 10^{-8} s$ y $dt_M = 0.2 s$, donde dt_m es el paso mínimo de integración y dt_M es el paso máximo de integración, para el intervalo de 5000 s a 5050 s se tiene $dt_m = 1 \times 10^{-8} s$ y $dt_M = 0.005 s$, para el tiempo de 5050 s a 5150 s se tiene un $dt_m = 1 \times 10^{-8} s$ y $dt_M = 0.01 s$, para el intervalo de tiempo 5150 s a 6000 s se tiene $dt_m = 1 \times 10^{-7} s$ y $dt_M = 0.2 s$. Esto fue motivado por la variación de resultados al alterar el paso de integración y que, por consecuente, en diferentes tiempos de la simulación la simulación exige mayor precisión de un evento a otro, como se ve en el intervalo de tiempo de 5000 s a 5150 s, que es donde el paso máximo de integración temporal es menor que en los otros tiempos debido al proceso de enfriamiento que conlleva reacciones de oxidación. Las condiciones iniciales y de frontera del experimento fueron descritas en la sección 1.2, donde la Figura 1.3 muestra el suministro de potencia a las barras calentadas eléctricamente, la Figura 1.4 muestra el vapor de agua insertado en el sistema y la Figura 1.5 muestra el nivel de agua en el sistema, todas las condiciones a partir de la fase transitoria. La comparación de dichas condiciones con las obtenidas con el código RELAP/SCDAPSIM 3.4 se muestra en la Figura 4.2-4.4. En la Figura 4.2, la potencia eléctrica simulada por el código es menor, comparada con la del experimento a partir del tiempo 3400 s. La diferencia de potencia durante la meseta, entre los tiempos 4625 s y 4800 s, es de 1.26 kW, lo cual representa el 5% por debajo de la potencia suministrada durante la simulación en ese periodo de tiempo. La Figura 4.3, señala una pequeña diferencia entre los 3000 s y los 3500 s en el suministro de vapor al ensamble debido a que el código estima 0.05 g/s de vapor por encima del vapor experimental; 2% por encima del valor experimental. La Figura 4.4, el código subestima el nivel de agua en el sistema durante la fase de enfriamiento con una diferencia de 400 mm. A pesar de ser una

condición a la que es sometida la simulación, dicha condición depende de la cantidad de vapor que calcule el código. Por lo que la Figura 4.4 sugiere que el código sobreestima la cantidad de vapor generado.

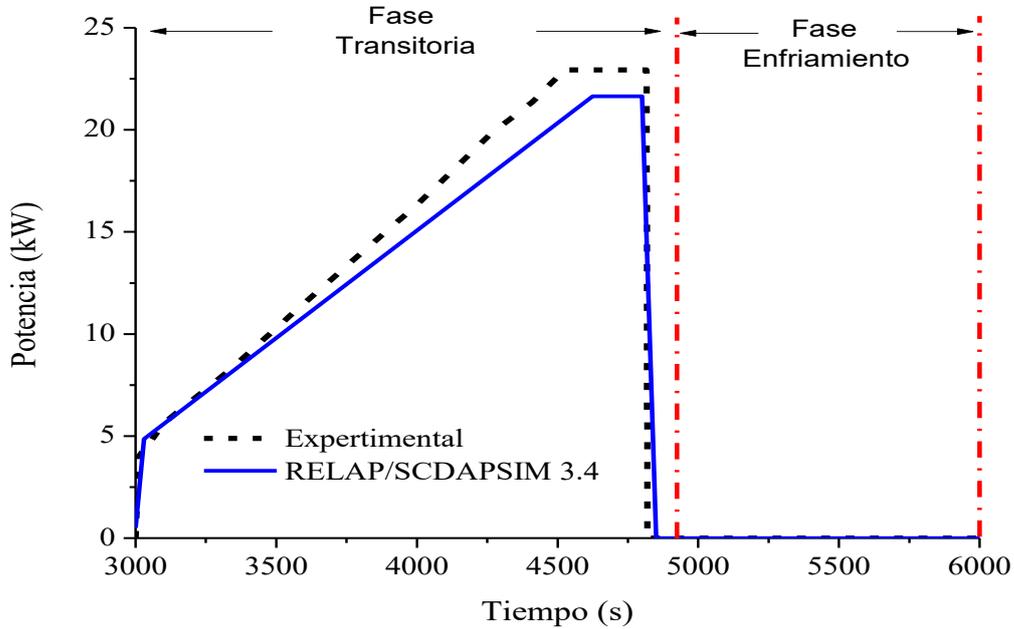


Fig. 4.2. Comparación de condiciones de potencia suministrada en el experimento con RELAP/SCDAPSIM 3.4.

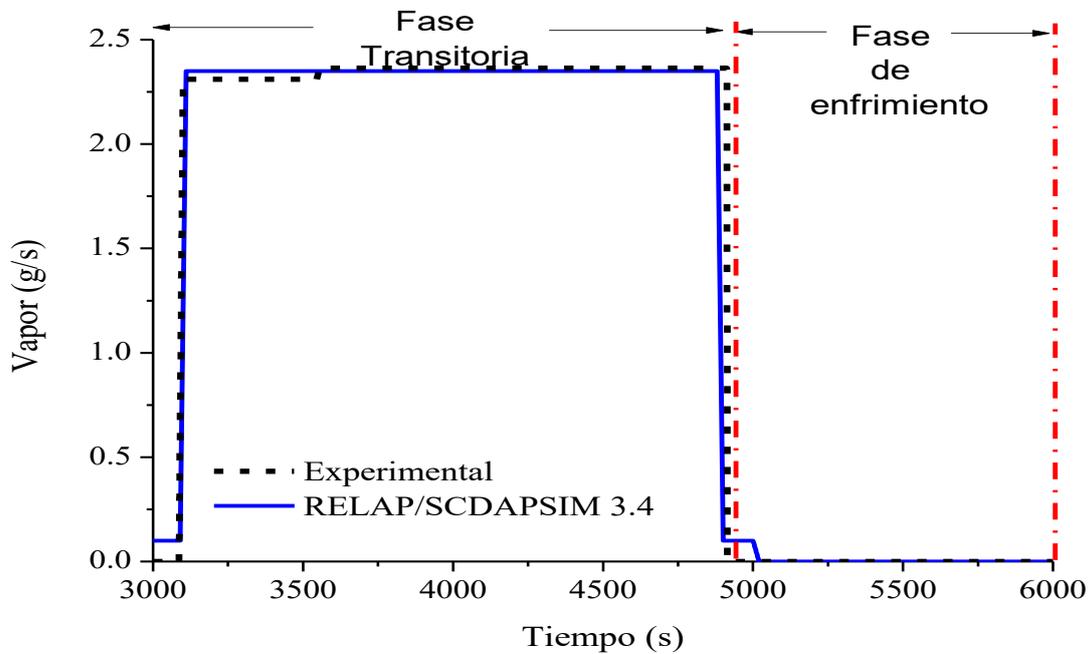


Fig. 4.3. Comparación de condiciones de inserción de vapor en el experimento con RELAP/SCDAPSIM 3.4.

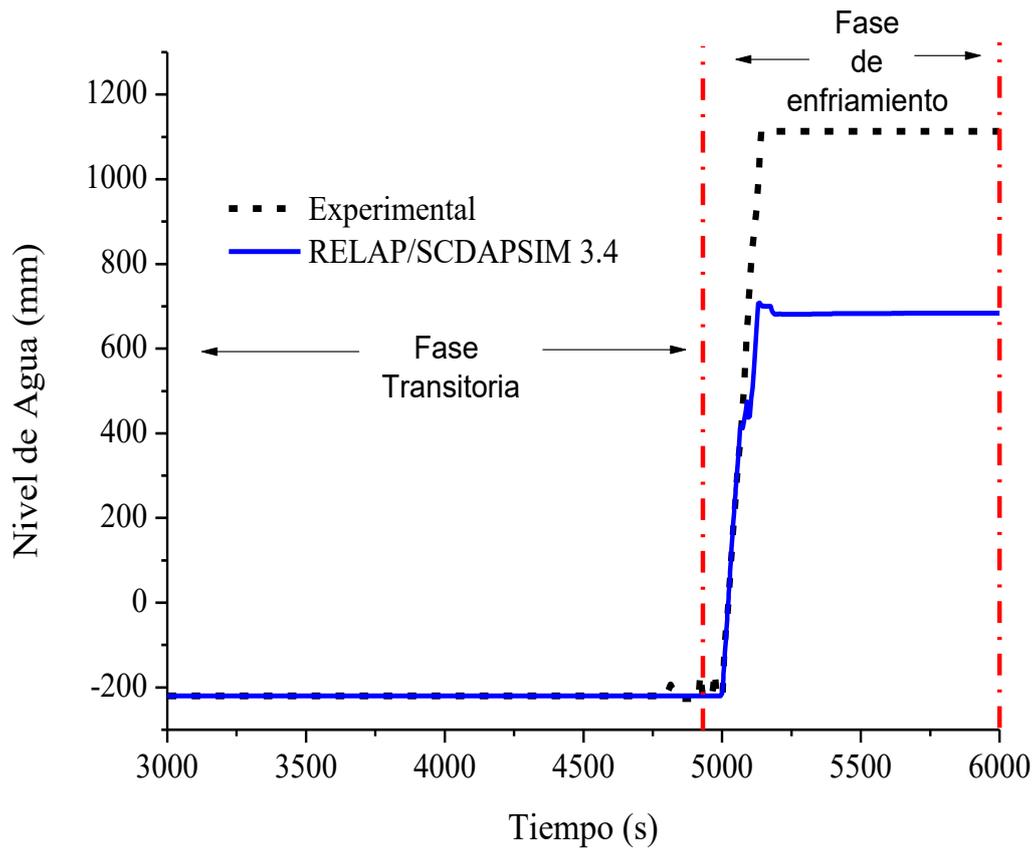


Fig. 4.4. Comparación del nivel de agua de enfriamiento en el experimento con RELAP/SCDAPSIM 3.4.

Con los nuevos despliegues añadidos a RELAP/SCDAPSIM 3.4, la representación de los componentes SCDAP en CORA-17 se muestra en la Figura 4.5 con las temperaturas iniciales.

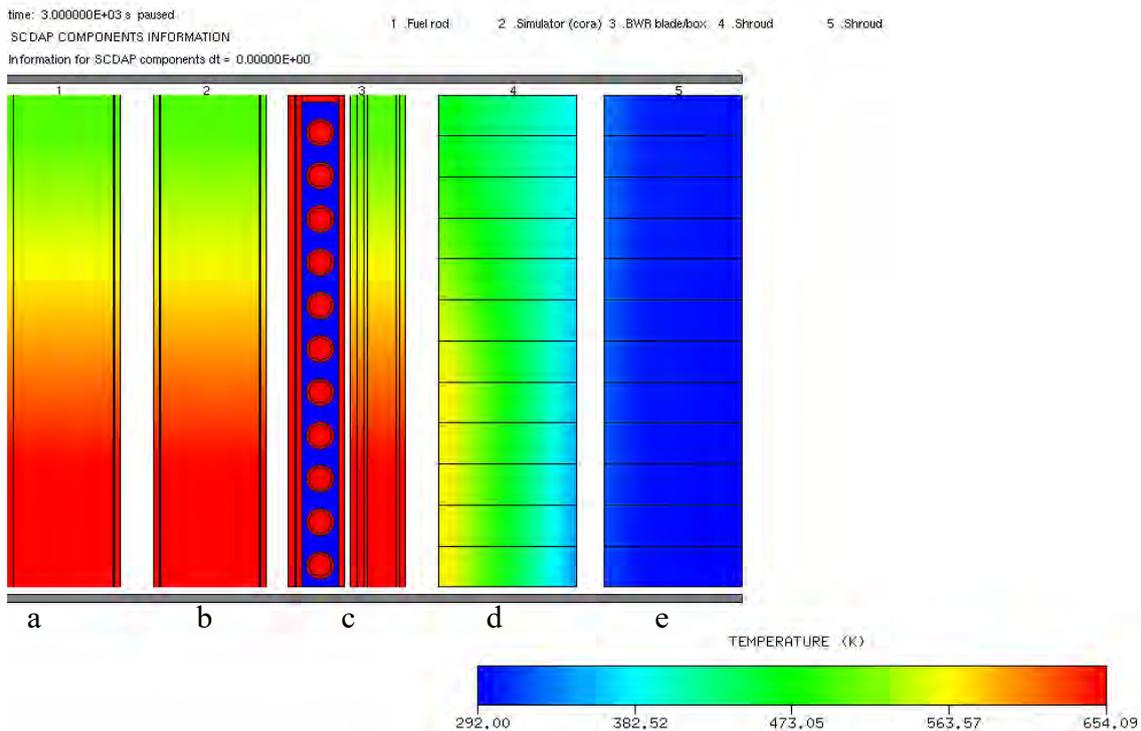
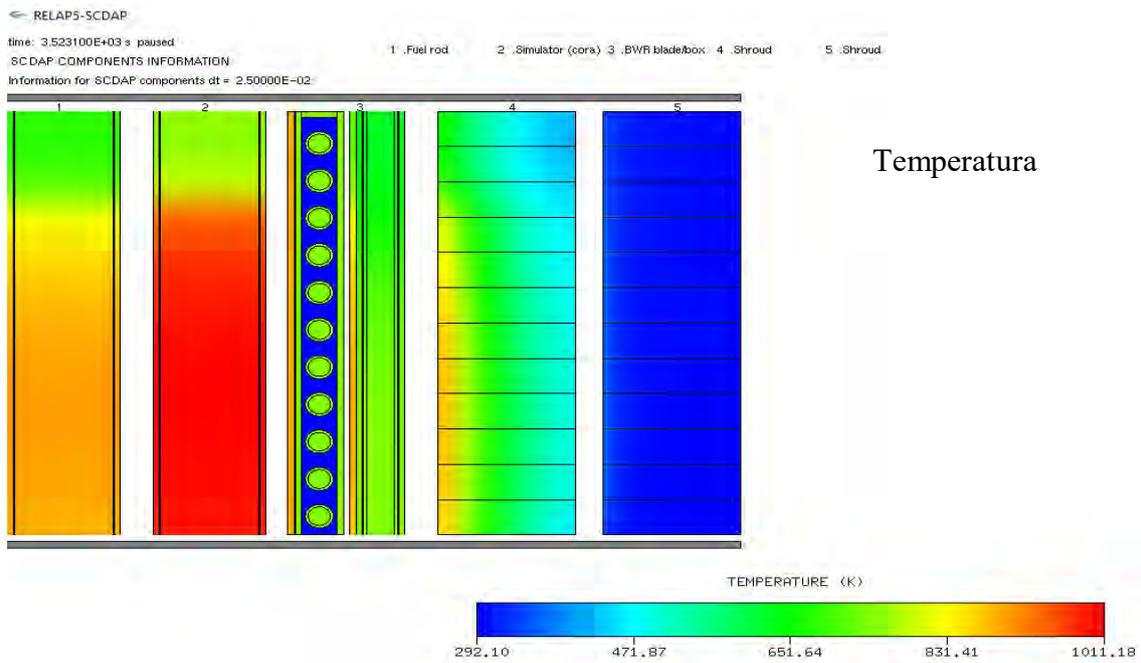
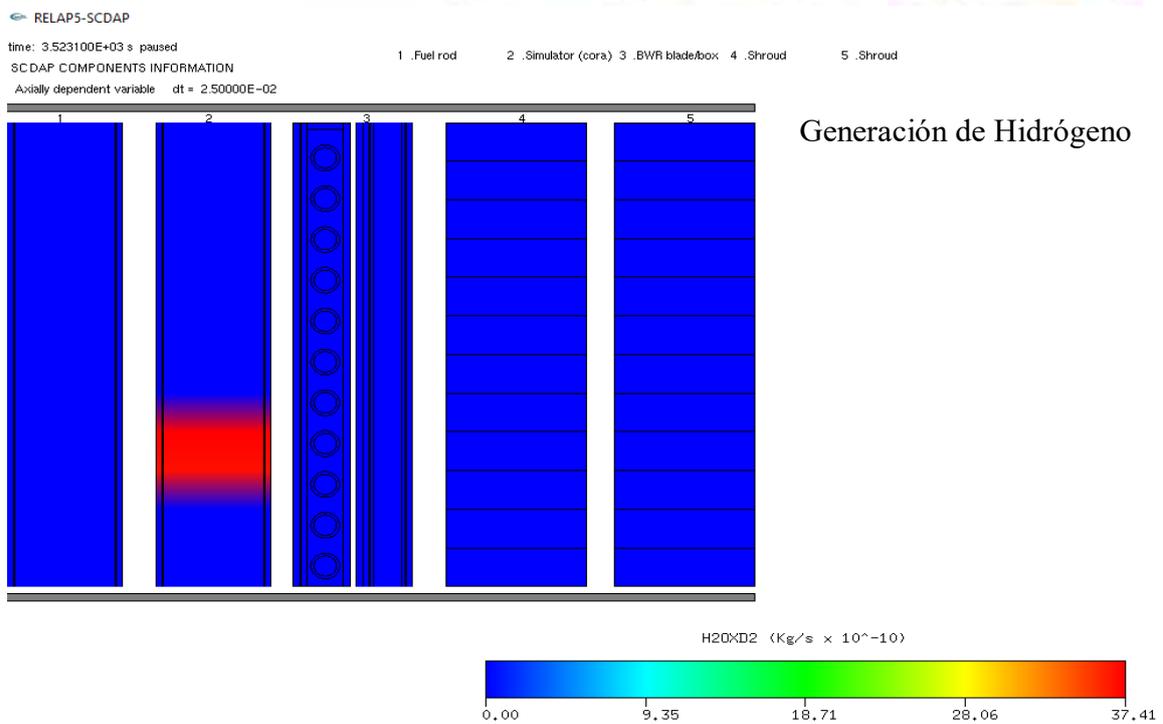


Fig. 4.5. Despliegue de componentes SCDAP de CORA-17 en RELAP/SCDAPSIM
 3.4. a) barra sin calentar, b) barra calentada eléctricamente, c) componente laminar BWR (blade/box), d) revestimiento del ensamble (shroud) y e) revestimiento de aislamiento.

Recordando las condiciones de la fase transitoria. El suministro de energía eléctrica y de vapor involucra un aumento en la temperatura en el sistema. Como es de suponer, los componentes que empiezan pronto la reacción son aquellos que tienen como material Zircaloy-4, ya que es el elemento con la temperatura de reacción más baja. Las barras de combustible calientes y las barras sin calentar cuentan con este material en su revestimiento. El primer componente en reaccionar es la barra calentada eléctricamente, esto sucede en el tiempo 3523 s, como se muestra en la Figura 4.6.



Temperatura



Generación de Hidrógeno

Fig. 4.6. Inicio de la generación de hidrógeno (Kg/s) en el ensamble, tiempo 3523 s.

Para corroborar la Figura 4.6, la Figura 4.7 muestra la acumulación de hidrógeno en gramos durante la simulación la cual el código tiene una subestimación del -36% comparada con la generada por el experimento al final de la simulación. La retroalimentación entre el aumento de temperatura debido a la potencia suministrada a

las barras calentadas eléctricamente, a la inserción de vapor de agua al ensamble, la reacción de oxidación y la liberación de energía, se ve acentuada la magnitud de la pendiente del hidrógeno generado entre el tiempo 4400 s. y 4820 s, antes de la fase de enfriamiento.

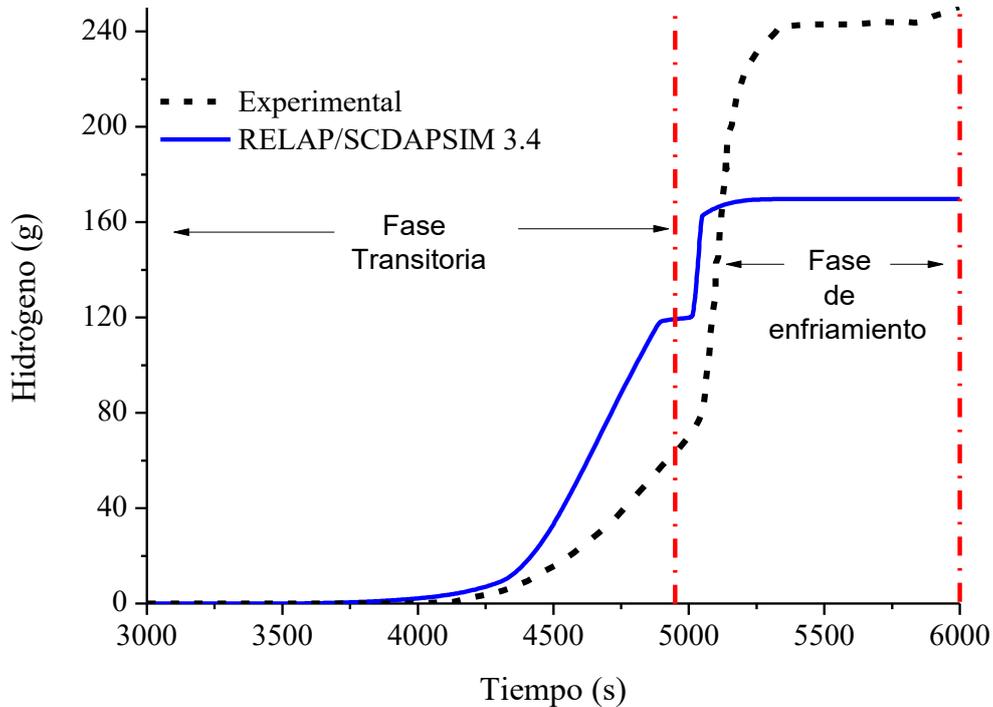


Fig. 4.7. Comparación de la producción de hidrógeno en RELAP/SCDAPSIM 3.4 con el experimento CORA-17.

Como se observa en la Figura 4.8, el componente con mayor generación de hidrógeno es el revestimiento del ensamble debido al área de interacción con el vapor, como muestra la ecuación 8 en la directa proporción del área de reacción. Otro aspecto que ofrece la Figura 4.8 son los órdenes de magnitud de generación de hidrógeno por segundo que, comparando con la Figura 4.6, pasan de 1×10^{-10} a 1×10^{-7} debido a que los componentes con materiales con Zircaloy y acero inoxidable alcanzan la temperatura de reacción en mayor cantidad de posiciones, excepto el B_4C que no reacciona ya que aún no se alcanza la temperatura para su reacción.

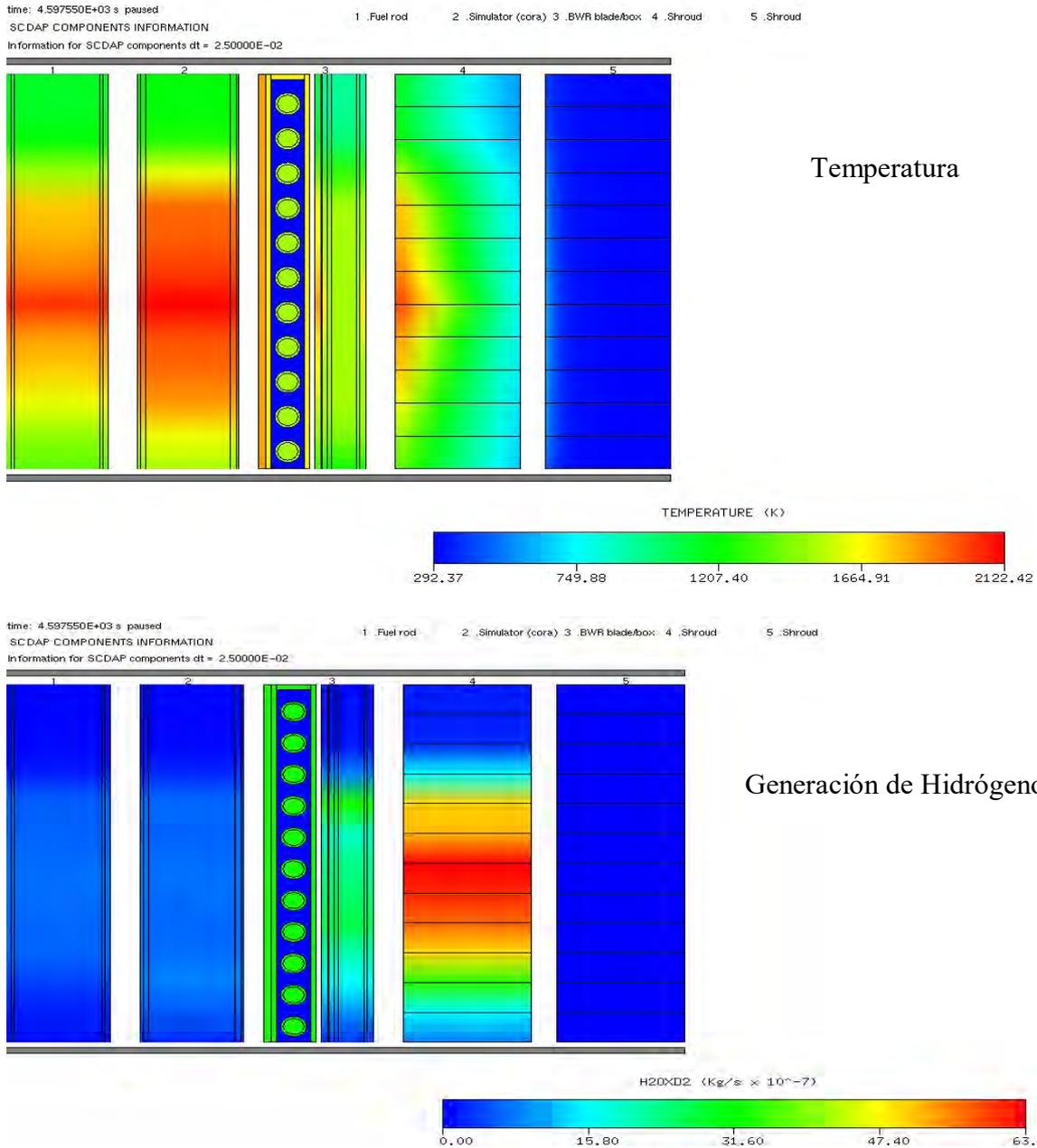


Fig. 4.8. Generación de hidrógeno en el tiempo 4600 s.

En el tiempo 4880 s, la Figura 4.7 tiene una meseta en la generación de hidrógeno debido a que deja de insertarse vapor de agua al sistema ya que inicia la fase de enfriamiento. Como consecuencia de lo anterior, uno de los límites para la reacción de oxidación es la disponibilidad de vapor y éste al no verse involucrado, la ecuación 11 predice una nula ganancia en peso de oxidación y este efecto se vería reflejado en un descenso de temperatura por la retroalimentación con la ecuación 7.

En la fase de enfriamiento, al introducir el agua, el aumento en la temperatura se da en la parte inferior del ensamble ya que de nuevo se tienen las condiciones de reacción. Sin embargo, al añadir agua a ritmo de 1 cm de altura por segundo, permite la evaporación y la reacción se pronuncia con una mayor pendiente como se ve ese comportamiento en la Figura 4.7, ya que hay más vapor de agua. En la Figura 4.9 se observa el inicio del hundimiento del ensamble.

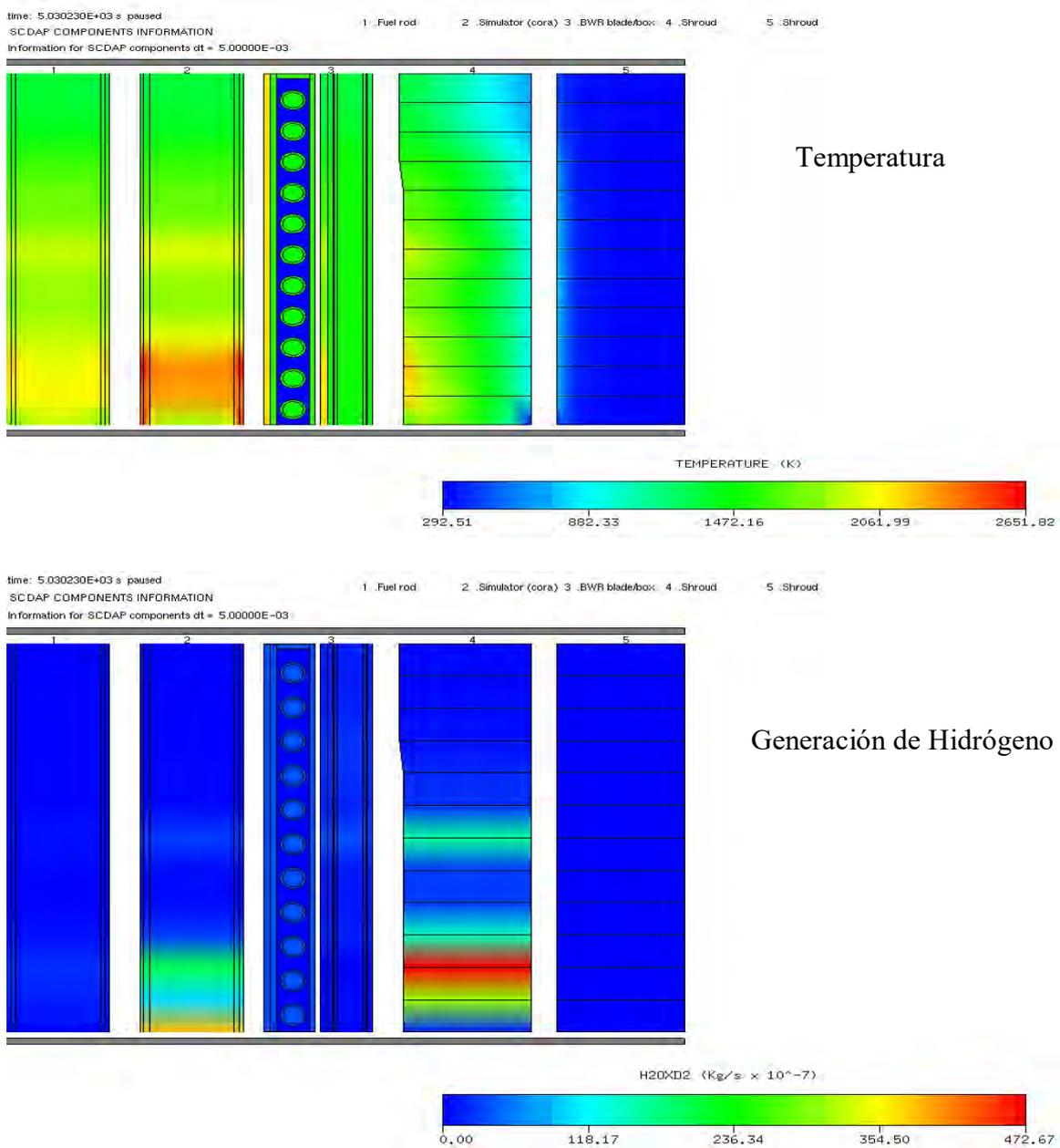


Fig. 4.9. Inicio de la fase de enfriamiento del ensamble.

De la Figura 4.9, el aumento de la temperatura empieza desde el revestimiento de la barra calentada eléctricamente, en el fondo del ensamble. Además, ahora la máxima razón de generación de hidrógeno comparada con la Figura 4.8 tiene una magnitud 7 veces mayor al inicio de la fase de enfriamiento que durante toda la fase transitoria.

La Figura 4.10 muestra cómo la temperatura empieza a aumentar en diferentes posiciones desde el fondo hasta el extremo superior del ensamble a medida que se enfría el sistema hasta que se obtiene un nivel de agua de aproximadamente de 700 mm de altura, lo cual puede ser observado en la Figura 4.4 y, en la Figura 4.11, se puede apreciar en función de la temperatura en el sistema que en concordancia con el nivel de agua está a 7 nodos desde el fondo del ensamble, gracias a que el revestimiento del ensamble (shroud) tiene marcados los nodos axiales, la temperatura de los componentes es prácticamente la temperatura del agua de enfriamiento, debido a que llegan al equilibrio de temperatura tanto el agua como los componentes, excepto el componente laminar BWR blade/box que solo muestra esa temperatura en ciertas regiones, para determinar el motivo de lo anterior es necesario analizar el nivel de daño. El código predice un menor nivel de agua comparado con el obtenido con el experimento. Esto se atribuye a que el código contempla una mayor cantidad de vapor generado, ya que entre el tiempo 5065 s a 5100 s de la Figura 4.4, se presenta un nulo aumento de nivel lo cual se traduce como evaporación.

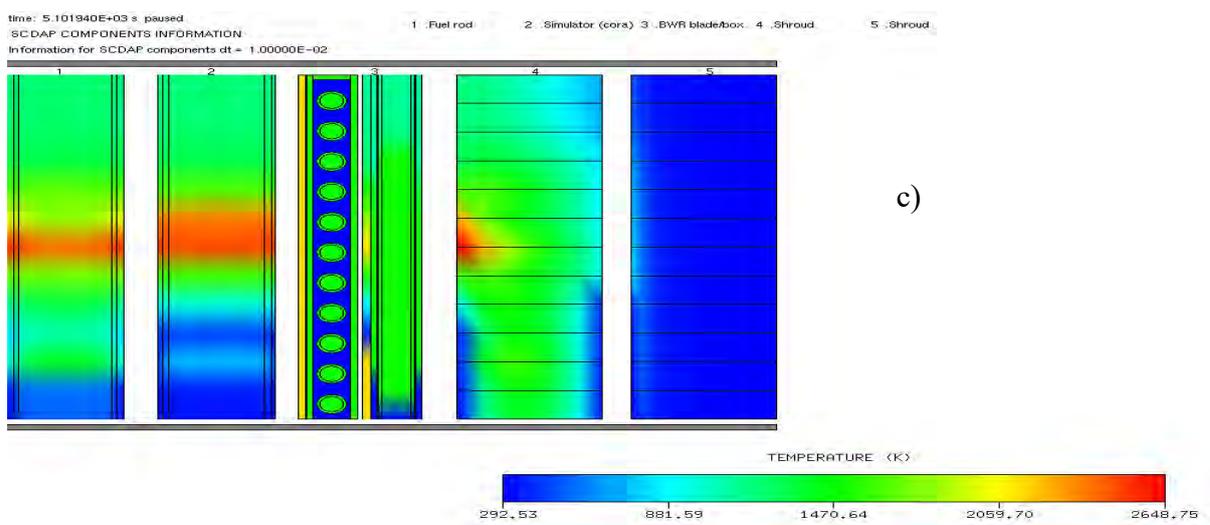
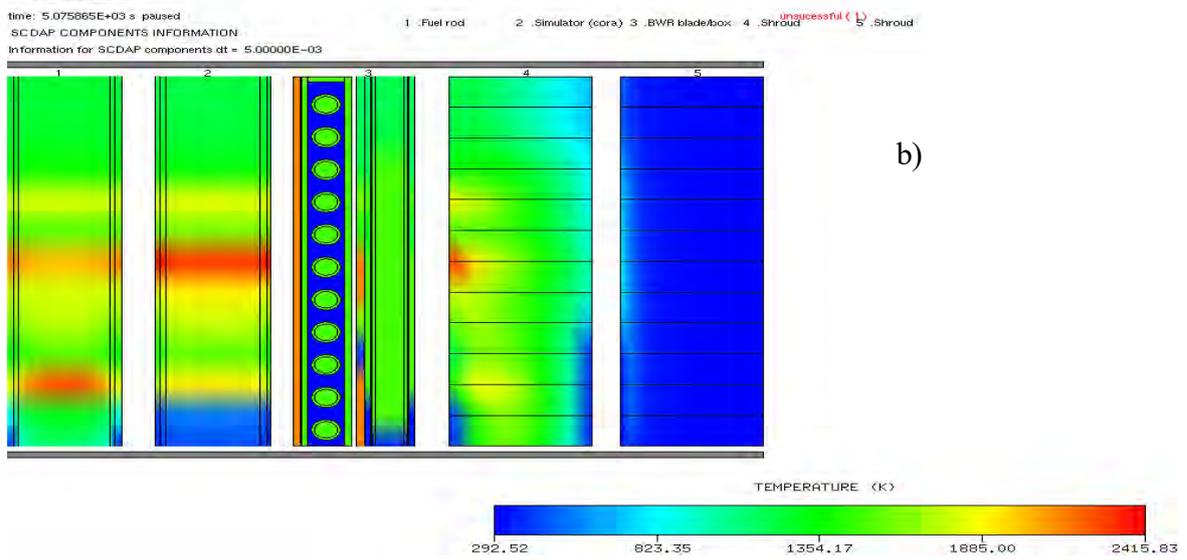
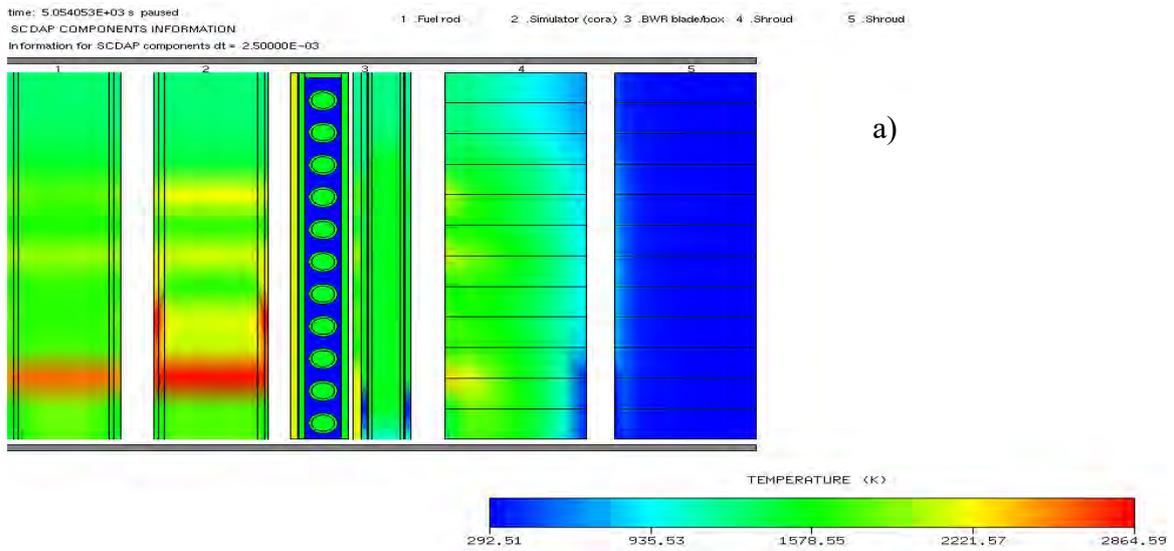


Fig. 4.10. Temperatura en diferentes tiempos de la fase de enfriamiento. a) 5054 s, b) 5075 s y c) 5101 s.

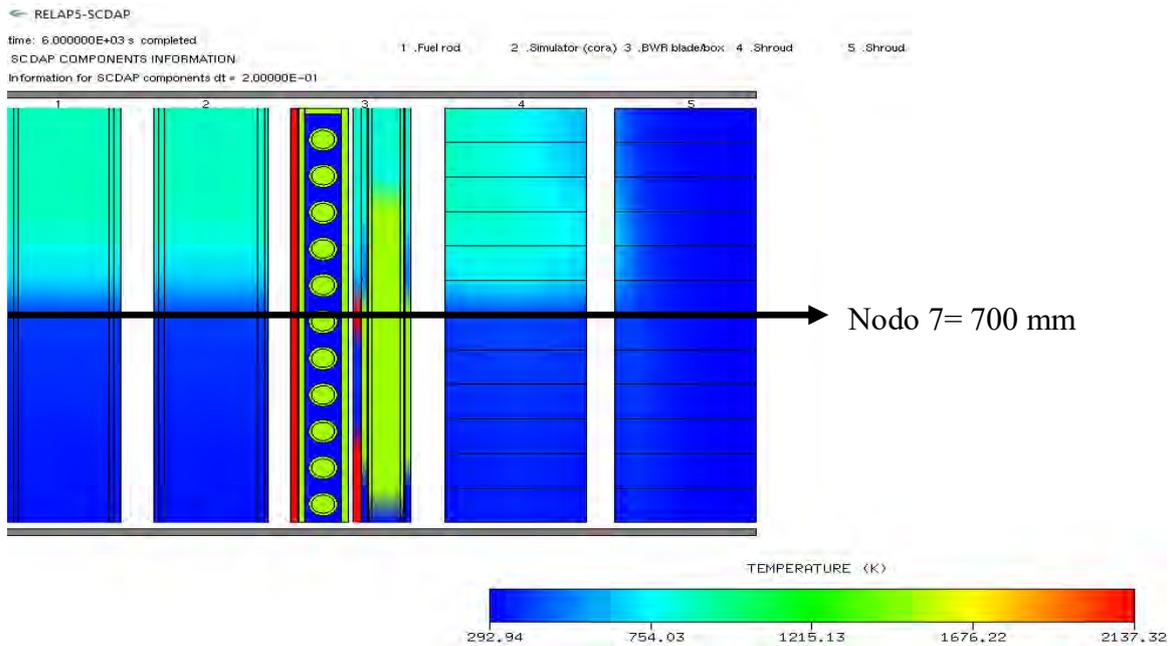


Fig. 4.11. Condiciones finales de temperatura de CORA-17 al tiempo 6000 s.

El nivel de daño después de la simulación muestra solo daño severo en el componente laminar BWR blade/box y ruptura debido a la hinchazón del revestimiento de la barra sin calentar, Figura 4.12. Cuando se considera la Figura 4.11 y la Figura 4.12, la temperatura del componente laminar BWR (blade/box) en la Figura 4.11 tiene valores que contradicen el efecto de enfriamiento en los nodos axiales 1-7, esto se debe a que los nodos 1, 2, 3 y 7 han sufrido recolocación de los dos segmentos del componente, por lo que dicha temperatura en esas secciones es considerada pero en otra posición, posición que no es posible visualizar todavía. En los nodos de la BWR (blade sheath) y en las barras de control no muestran daño en los nodos 4-6. Sin embargo, no tienen temperatura de equilibrio con el agua debido a que el daño dado en los nodos aledaños (3 y 7) deformó al componente imposibilitando así la filtración del agua de refrigeración.

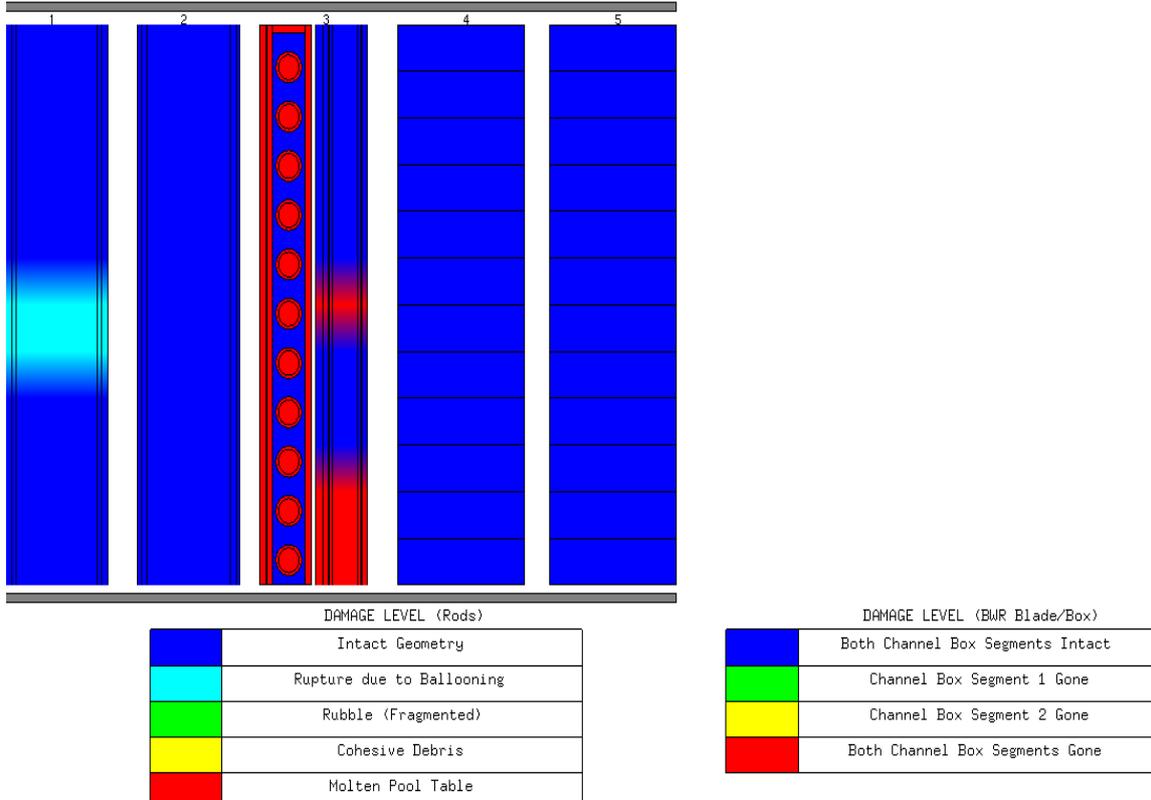


Fig. 4.12. Nivel de daño al tiempo 6000 s de la simulación.

4.3 Comparación de temperaturas experimentales

En la sección anterior se compararon algunos resultados experimentales con los generados por RELAP/SCDAPSIM 3.4; potencia suministrada a las barras calentadas, vapor de agua suministrado, nivel de agua y producción de hidrógeno. La comparación de temperaturas en diferentes posiciones de los componentes provee información acerca de las tendencias.

Durante la fase transitoria, por medio de la inserción de potencia eléctrica y la liberación de energía debido a la reacción de oxidación, hay un aumento de temperatura

en los componentes del ensamble. En la Figura 4.13 se muestra la temperatura en la barra sin calentar a una altura de 950 mm. Entre los tiempos 3000 s y 3800 s se tiene una buena estimación por parte del código, donde el máximo error es del 6.8% por encima de la temperatura experimental en el tiempo 3300 s. Posteriormente, las temperaturas divergen dando el código una subestimación de la temperatura entre los tiempos 3800 s y 4600 s con un error máximo en el tiempo 4400 s del -24.9% con respecto a la temperatura experimental. Entre el periodo de tiempo de 4600 s a 5000 s, hay una sobre estimación de la temperatura por parte del código del 19.1% en el tiempo 4800 s, momento en que la temperatura desciende debido a la interrupción de la potencia suministrada. En la fase de enfriamiento, aproximadamente en el tiempo 5000 s, el aumento de temperatura en el componente es ocasionado por la inserción de agua de enfriamiento por la liberación de energía debido a la reacción de oxidación, sin embargo, el código subestima la temperatura ya que, como se observa en la Figura 4.7, también subestima la generación de hidrógeno, lo cual se traduce en menor cantidad de energía liberada por la reacción y repercute proporcionalmente en la temperatura. En el periodo de 5000 s a 6000 s, aunque el código responde a la tendencia del experimento, muestra el error máximo de toda la simulación con un valor del -28.1% con respecto al valor experimental en el tiempo 5100 s. En la Tabla 4.3 se resume la información de error en diferentes periodos de la Figura 4.13.

Un análisis como el descrito en el párrafo anterior se puede extrapolar a las Figuras 4.14-4.19, donde, en las Tablas 4.4-4.9, se muestran los porcentajes de error máximos con respecto a los valores experimentales.

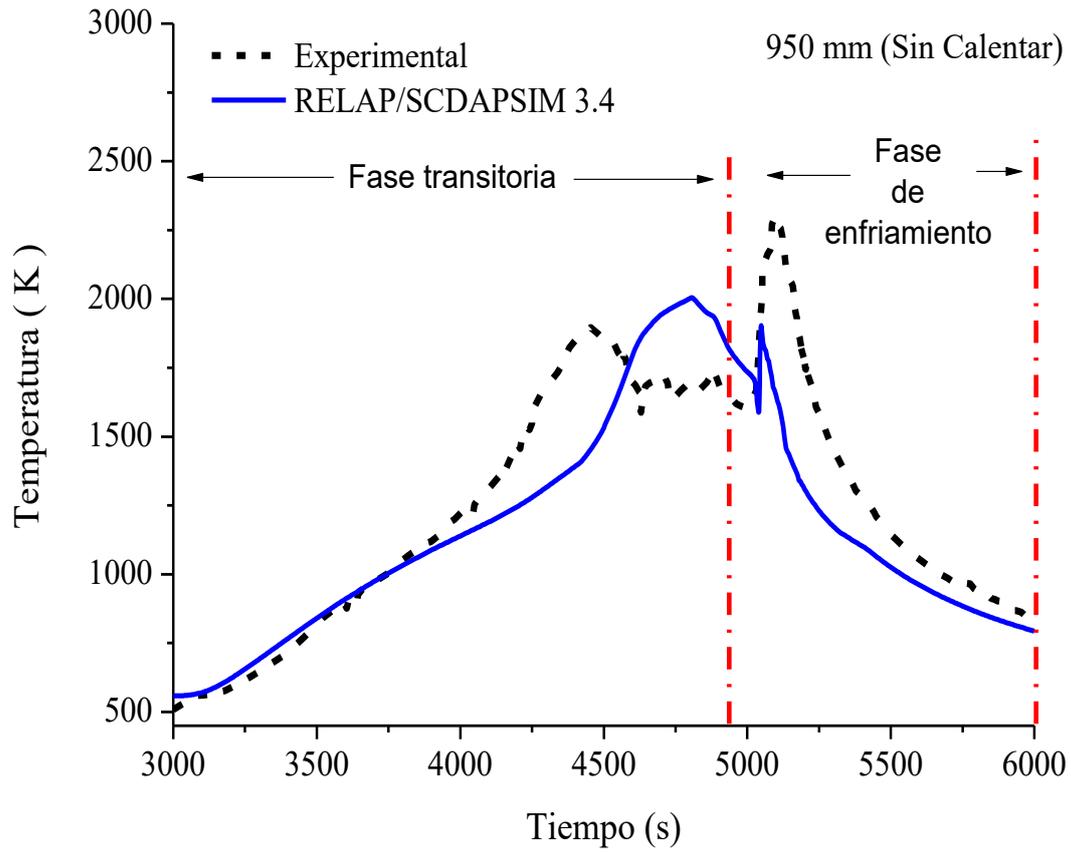


Fig. 4.13. Comparación de temperatura de la barra sin calentar a 950 mm.

Tabla 4.3. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.13.

Periodo de tiempo (s)	Tiempo(s)	Máximo error (%)
3000-3800	3300	5.6
3800-4600	4400	-24.9
4600-5000	4800	19.1
5000-6000	5100	-28.1

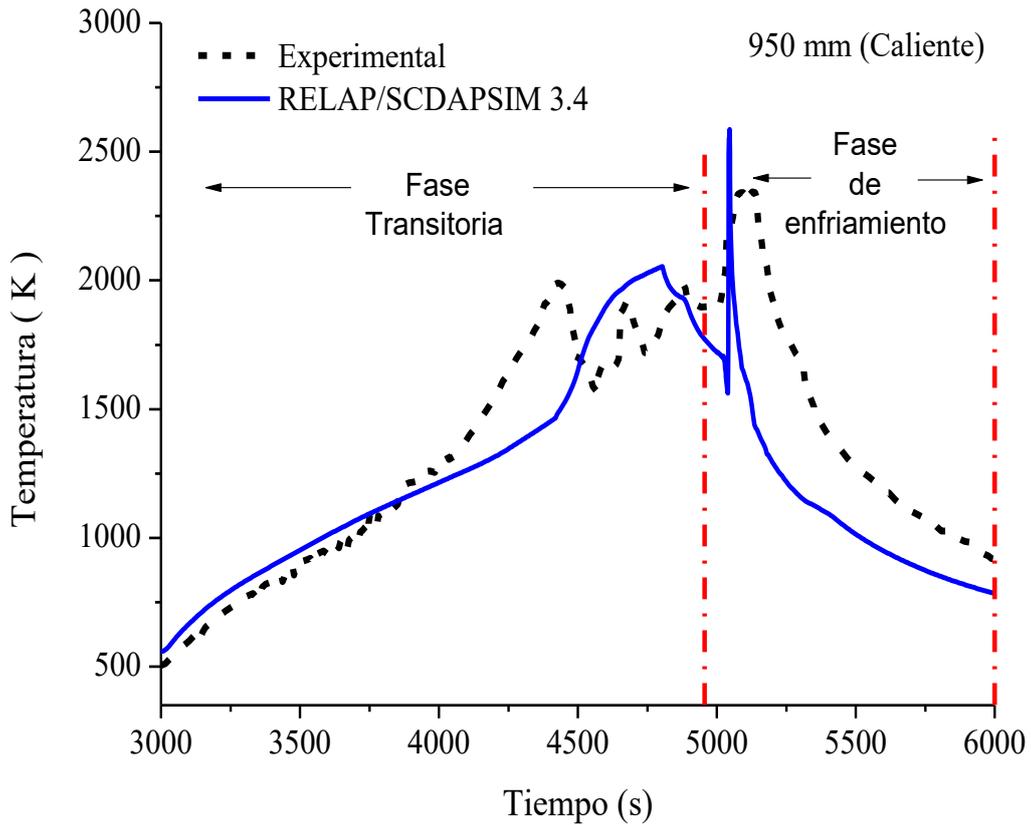


Fig. 4.14. Comparación de temperatura de la barra calentada eléctricamente a 950 mm.

Tabla 4.4. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.14.

Periodo de tiempo (s)	Tiempo(s)	Máximo error (%)
3000-3800	3150	12.2
3800-4500	4430	-25.2
4500-4825	4750	17.9
4825-5040	5040	-28.4
5040-6000	5165	-35.4

En las Figuras 4.15 y 4.16 se muestra una discontinuidad en cuanto a la temperatura del experimento, esto se le atribuye a fallas del termopar.

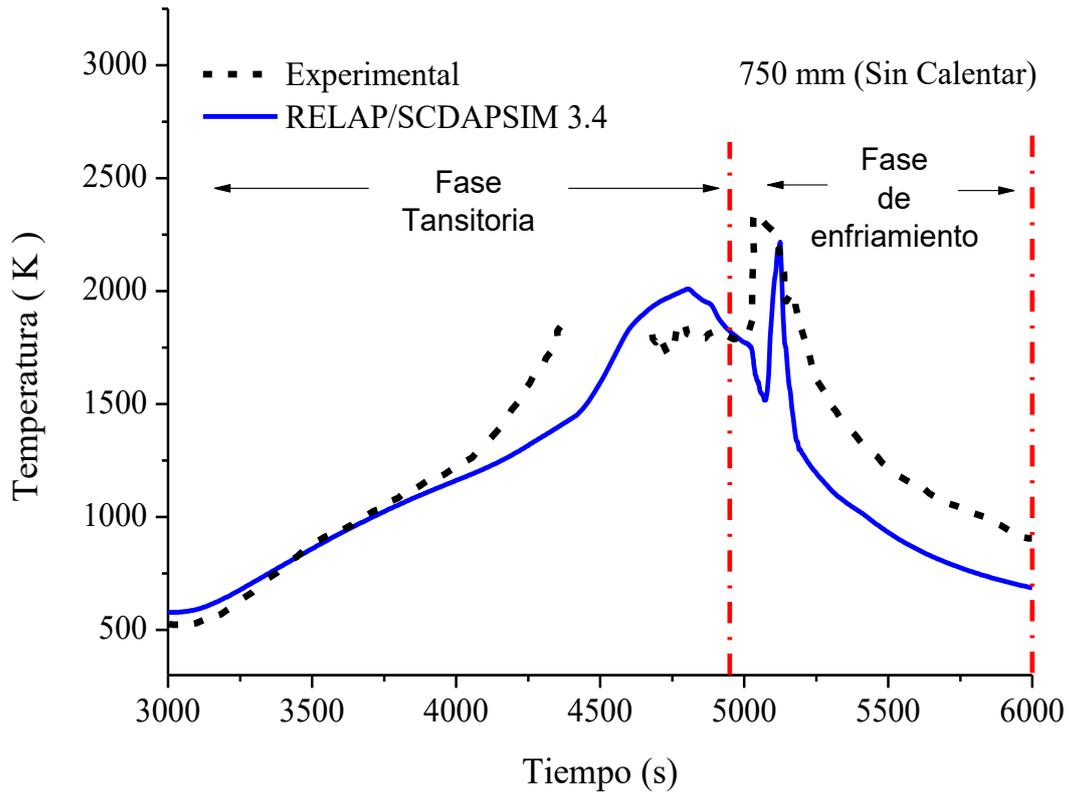


Fig. 4.15. Comparación de temperatura de la barra sin calentar a 750 mm.

Tabla 4.5. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.15.

Periodo de tiempo (s)	Tiempo(s)	Máximo error (%)
3000-3750	3050	11.3
3750-4380	4380	-24.6
4680-4930	4805	11.0
4930-6000	5210	-29.3

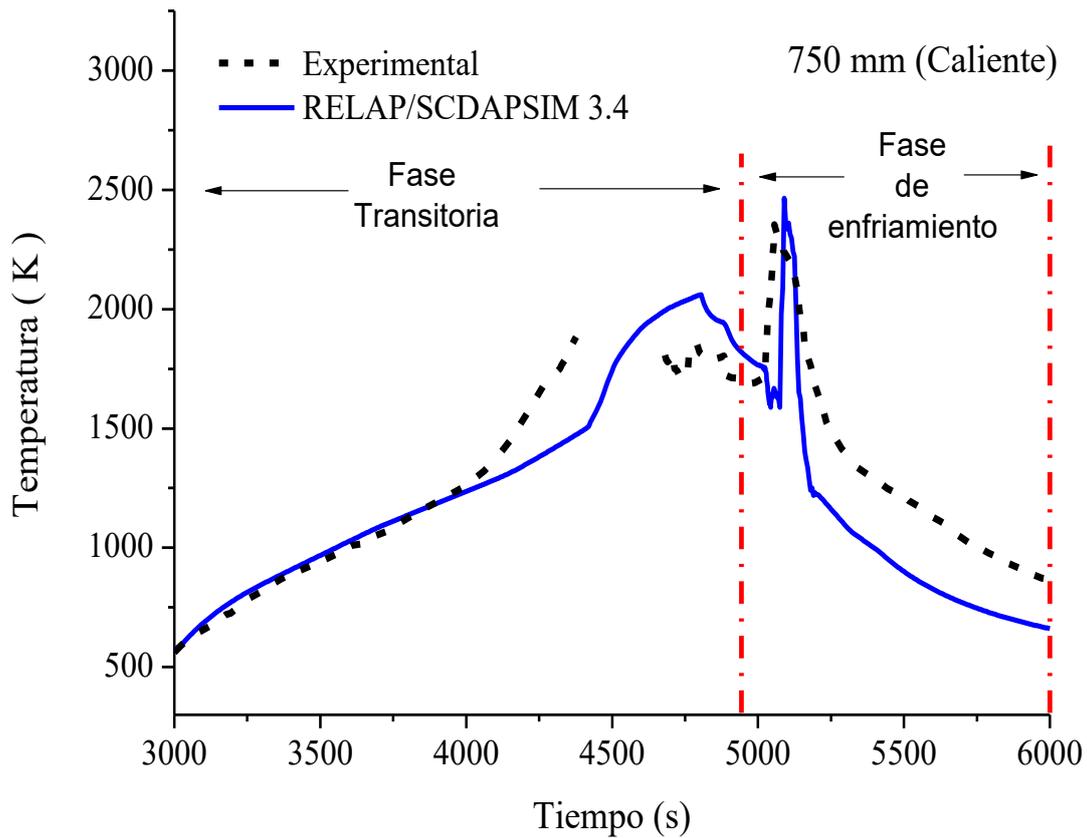


Fig. 4.16. Comparación de temperatura de la barra calentada eléctricamente a 750 mm.

Tabla 4.6. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.16.

Periodo de tiempo (s)	Tiempo(s)	Máximo error (%)
3000-4000	3194	11.3
4000-4380	4380	-21.9
4681-5000	4805	15.7
5000-6000	5210	-25.5

La Figura 4.17 muestra la temperatura en la parte superior del componente laminar BWR blade/box. El experimento indica temperaturas mayores que las estimadas por el código, para explicar esta diferencia, hay que recordar que el nivel de agua que predice

el código es menor, 700 mm por parte del código contra los 1100 mm experimentales, lo que se interpreta que el vapor de agua se ve consumido por la reacción exotérmica de oxidación en zonas cercanas a ese nivel de agua, aminorando el inventario de vapor que puede llegar hasta la parte superior. De esto anticipa una menor temperatura en la parte superior, además de la diferencia en la producción de hidrógeno con respecto al valor experimental.

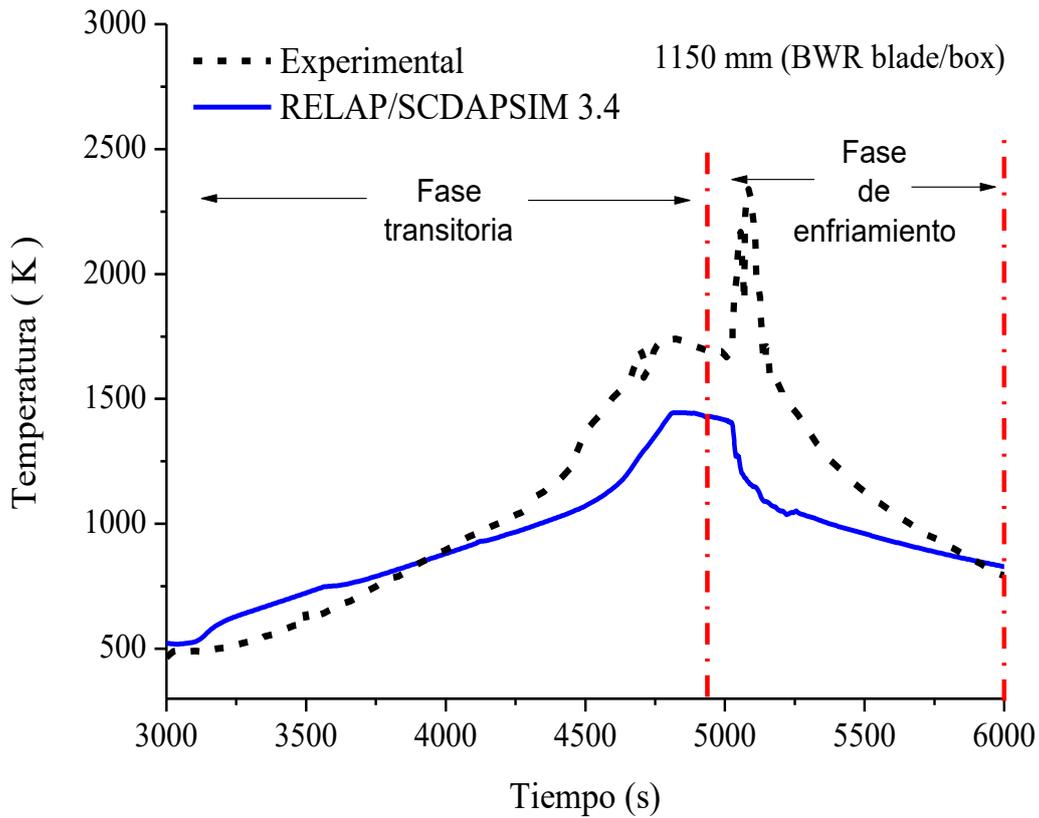


Fig. 4.17. Comparación de temperatura de la BWR blade/box a 1150 mm.

Tabla 4.7. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.17.

Periodo de tiempo (s)	Tiempo(s)	Máximo error (%)
3000-4000	3194	22.4
4000-6000	5210	-50.1

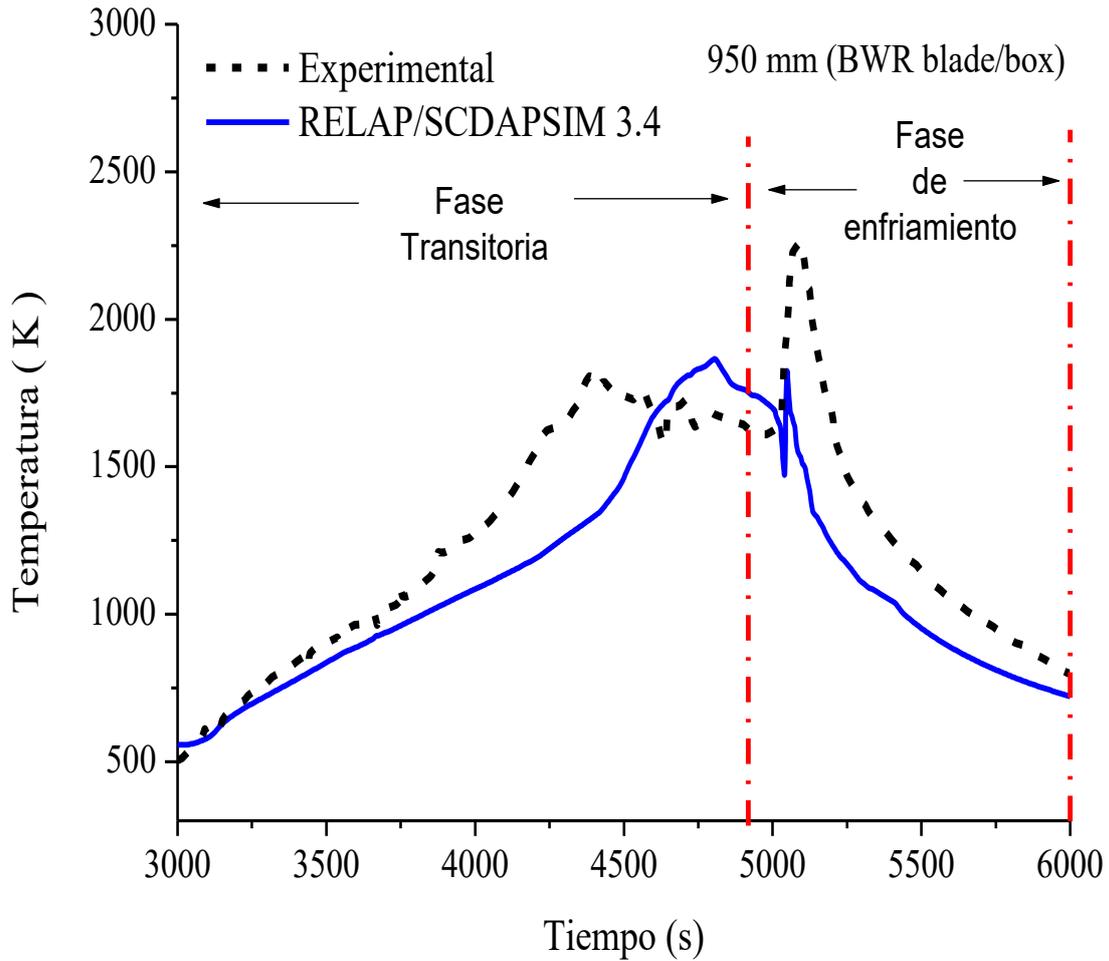


Fig 4.18. Comparación de temperatura de la BWR blade/box a 950 mm.

Tabla 4.8. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.18.

Periodo de tiempo (s)	Tiempo(s)	Máximo error (%)
3000-4550	4385	-26.9
4550-5000	4380	-11.1
5000-6000	5210	-32.3

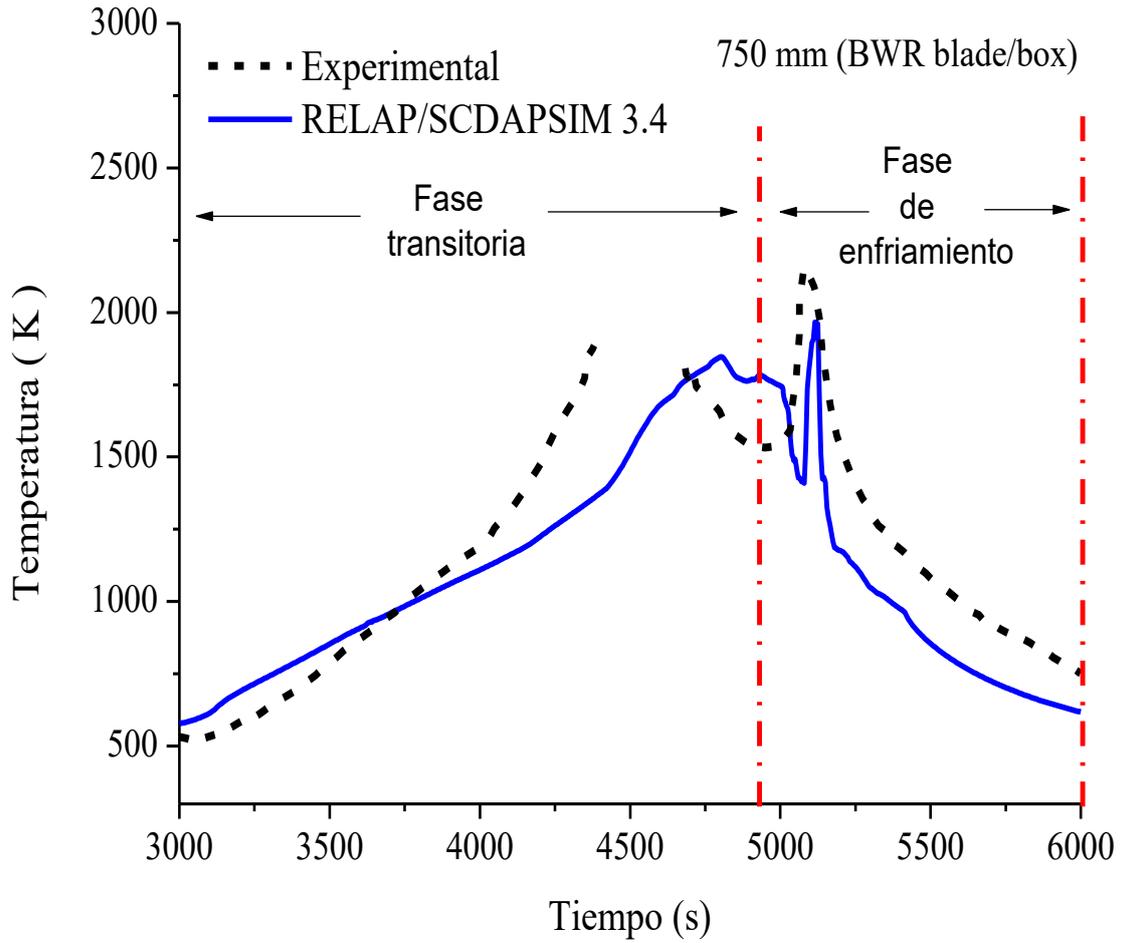


Fig. 4.19. Comparación de temperatura de la BWR blade/box a 750 mm.

Tabla 4.9. Porcentaje del máximo error de la temperatura simulada con respecto a la temperatura experimental de la Figura 4.19.

Periodo de tiempo (s)	Tiempo(s)	Máximo error (%)
3000-3750	3250	17.6
3750-4380	4380	-28.0
4683-5000	4805	15.1
5000-6000	5080	-34.6

Conclusión

El nivel de daño sugerido por el código, Figura 4.12, está subestimado comparándolo con el experimento que reporta una fundición total del componente laminar BWR (blade/box), Figura 4.1. La Figura 4.7, que compara la generación de hidrógeno del código y el experimento, hace alusión a una carencia en predicción por parte del código. Esto se debe a que el código, RELAP/SCDAPSIM 3.4, durante la simulación: el B_4C , material colocado dentro de las barras de control, nunca alcanza siquiera la temperatura de reacción de oxidación de 1700 K, como se reporta en todas las termografías haciendo que fluctúe la cantidad de generación de hidrógeno y a su vez, de energía. Los valores de la temperatura en los diferentes componentes mostrados en las Figuras 4.13-4.19 generados por RELAP/SCDAPSIM 3.4 y comparados con el experimento CORA-17 muestran la misma tendencia durante los fases del experimento, sin embargo, los errores máximos en diferentes periodos de tiempo oscilan, por regularidad, entre el -50% y el 11% con respecto a los valores experimentales, dejando a los errores más significativos durante la fase de enfriamiento por la subestimación de hidrógeno generado por reacción de oxidación; fluctuando la temperatura de manera considerable.

Algunas de las sugerencias para mejorar el código y a su vez los resultados del experimento CORA-17, sería la implementación de las ecuaciones 2 y 3 para la reacción de B_4C y, ya sea un estudio más profundo o una depuración del código para determinar el motivo por el cual las barras de control contenidas en el BWR (blade/box) no alcanzan la temperatura de reacción, ya que dado el reporte de KIT, es el

componente que proporciona más cantidad de hidrógeno que los demás componentes en el ensamble.

Gracias a la herramienta de visualización de componentes SCDAP implementada en el código, se hace más fácil el análisis como se mostró en este capítulo 4, además de ahorrar tiempo en el orden de datos y generar gráficas, ya que la herramienta los genera en cada paso de integración dejando la posibilidad de hacer vídeos.

Trabajo Futuro

El código continúa en fase de mejoramiento, para un trabajo futuro se podrá hacer un análisis con el paquete de incertidumbres que ha sido implementado en el código recientemente. Este paquete permite determinar la sensibilidad de la simulación con base en la variación de parámetros, provocando así una dispersión de resultados atribuidos a dicha variación dentro de un intervalo de confianza. Con la variación de parámetros mediante el paquete de incertidumbres se pueden comparar los valores reportados por el experimento CORA-17 y los estimados por el código dentro del intervalo de confianza, estimulando un análisis más exhaustivo, incluyendo aún el análisis del paso de integración temporal.

Referencias

1. KIT. (9 /enero/ 2018). QUENCH Programme at KIT. Karlsruhe, Alemania: KIT. Recuperado de: <http://quench.forschung.kit.edu/index.php>.
2. S. Hagen, P. Hofmann, V. Noack, L. Sepold, G. Schanz, G. Schumacher, “*Comparision of the Quench experiments CORA-12, CORA-13, CORA-17*”, Forschungszentrum Karlsruhe, Agosto-1996.
3. Pshenichnikov A., Stuckert J.. (12/enero/2018). Karlsruhe, Alemania: Microstructure and mechanical properties of Zircaloy-4 claddings hydrogenated at temperatures typical for LOCA conditions. Recuperado de: http://www.iam.kit.edu/awp/downloads/Pshenichnikov_QWS19_2013.pdf
4. S. Hagen, P. Hofmann, V. Noack, L. Sepold, G. Schanz, G. Schumacher, “*Comparision of the Quench experiments CORA-12, CORA-13, CORA-17*”, (pp. 3-10), Forschungszentrum Karlsruhe, Agosto-1996.
5. SCDAP/RELAP5 Development Team “*RELAP5/MOD3 Code Manual Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods*”. (pp 3-3 – 3-11), NUREG/CR-5535-V1, INEL-95/0174, Idaho, Junio 1995.
6. SCDAP/RELAP5 Development Team “*SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual Volume III: Apendix A*”. (pp. A7-15), NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Idaho, Noviembre 1997.
7. SCDAP/RELAP5 Development Team “*SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual Volume II: Damage Pogression Model Theory*”. (pp. 2-1 – 2-7), NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Idaho, Octubre 1997.
8. SCDAP/RELAP5 Development Team “*SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual Volume III: User’s Guide and Input Manual*”. (pp. 3-14 – 3-16), NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Idaho, Octubre 1997
9. SCDAP/RELAP5 Development Team “*SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual Volume III: User’s Guide and Input Manual*”. (pp. 3-1), NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Idaho, Noviembre 1997.
10. Madokoro, H., Okamoto, K.,Allison, C., Siefken, L., Hohorst & J., Hagen, S. (2014). Assessment of RELAP/SCDAPSIM/MOD 3.5 against the BWR core degradation experiment CORA-17. “*The 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10)*”, NUTHOS10-1243. Okinawa, Japón, Diciembre 14-18, 2014.
11. John M. Kessenich, Graham M. Sellers, Dave Shreiner, *OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 4.5 with SPIR-V*, Pearson Education, Boston, Estados Unidos (2016).

12. Torra Vicenç, *Del Ábaco a la Revolución Digital. Algoritmos y Computación*, (pp. 129-130) EDITEC, España, 2011.
13. SCDAP/RELAP5 Development Team, “*SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual, SCDAP Volume IP*”(pp. 2-1 – 2-7), NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Idaho, Julio 1998.
14. SCDAP/RELAP5 Development Team, “*SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual, SCDAP Volume IP*”(pp. 2-1 – 5-20) NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Idaho, Julio 1998.
15. S. Hagen, P. Hofmann, V. Noack, L. Sepold, G. Schanz, G. Schumacher, “*Comparision of the Quench experiments CORA-12, CORA-13, CORA-17*” (pp. 7). Forschungszentrum Karlsruhe, Agosto-1996.
16. S. Hagen, P. Hofmann, V. Noack, L. Sepold, G. Schanz, G. Schumacher, “*Comparision of the Quench experiments CORA-12, CORA-13, CORA-17*” (pp. 45). Forschungszentrum Karlsruhe, Agosto-1996.
17. S. Hagen, P. Hofmann, V. Noack, L. Sepold, G. Schanz, G. Schumacher, “*Comparision of the Quench experiments CORA-12, CORA-13, CORA-17*” (pp. 7). Forschungszentrum Karlsruhe, Agosto-1996.
18. SCDAP/RELAP5 Development Team, “*SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual, SCDAP Volume V*” (pp. 4-228) NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Idaho, Julio 1998.
19. SCDAP/RELAP5 Development Team, “*SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual, SCDAP Volume V*” (pp. 5-12 – 5-13) NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Idaho, Julio 1998.
20. SCDAP/RELAP5 Development Team, “*SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual, SCDAP Volume II*” (pp. 3-1 – 3-2) NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Idaho, Julio 1998.
21. SCDAP/RELAP5 Development Team, “*SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual, SCDAP Volume II*” (pp. 5-8 – 5-9) NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Idaho, Julio 1998.