



**PROYECTO INTEGRADOR DE LA CARRERA INGENIERIA NUCLEAR CON
ORIENTACION EN APLICACIONES**

**Simulación y análisis determinista de seguridad aplicado al LOOP
del RA-10: Análisis en estado estacionario y evolución del sistema
frente a un LOFA con evaluación del volante de inercia de la
bomba del SPTC**

Carabajal Catalina

Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson
Universidad de San Martín
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina — 2018

**Simulación y análisis determinista de seguridad
aplicado al LOOP del RA-10: Análisis en estado
estacionario y evolución del sistema frente a un LOFA
con evaluación del volante de inercia de la bomba del
SPTC**

Carabajal Catalina

**PROYECTO INTEGRADOR DE LA CARRERA INGENIERIA NUCLEAR CON
ORIENTACION EN APLICACIONES**

Director(a):

Mgter. Hilal Roberto E.

Área de trabajo:

Gerencia de Reactores y Centrales Nucleares CAC-CNEA

Departamento de seguridad nuclear y termo hidráulica

Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson

Universidad Nacional de San Martín

Comisión Nacional de Energía Atómica

Argentina — 2018

**A mi familia que siempre me apoyo,
y a mi novio que me acompaño en cada momento.**

No existe una combinación de sucesos que la
inteligencia de un hombre no sea capaz de
explicar.

Sir Arthur Conan Doyle

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecerle a Dios quien siempre ilumino mi camino y permitió que pudiera realizar esta carrera y concluir con este trabajo tan gratificante.

Quiero agradecer a mi familia, en particular a mi mamá, Alejandra Blanchart que estuvo conmigo en cada momento y a mi abuela Blanca Olivera quienes siempre me alentaron a seguir adelante y cumplir cada meta propuesta.

Les agradezco a mi hermana mayor Florencia Carabajal y a mi cuñado Damian Almirall por darme alojamiento en los primeros años de la carrera y creer siempre en mi, ayudandome y acompañandome en todo lo que les fuese posible.

A mi papa y mis hermanos por el apoyo incondicional que me brindaron todos estos años.

A mis suegros Juana Gervasoni y Raúl Barrachina, quienes me aconsejaron y ayudaron siempre que pudieron.

Y en particular a mi novio Agustin Barrachina, quien me acompaño en cada paso que di, incitandome a nunca bajar los brazos.

También me gustaria agradecerle al instituto por darme la posibilidad de desarrollarme académicamente, y acompañarme día a día en este camino.

Quiero agradecer a las autoridades del instituto que estuvieron dispuestos a escuchar y resolver cada problema que surgió, y abrieron los caminos necesarios para que podamos hacer uso de cada herramienta adquirida durante las pasantías de verano y en cada oportunidad posible, permitiendo que podamos ampliar nuestros horizontes profesionales.

A Natalia Bidart y Valeria Kaplan por brindarnos toda su ayuda cada vez que les resultó posible, y con Ricardo Ramos, quien estuvo dispuesto a escuchar cada preocupación o queja que nos acontecia.

Quiero agradecer a mi director de tesis Roberto Hilal por darme la posibilidad de desempeñar las habilidades adquiridas a lo largo de la carrera en el campo de la seguridad nuclear.

Me gustaría agradecerles a los profesores de la cátedra de Diseño de instalaciones nucleares, Facundo Boschetti y Juan Beliera, quienes me aconsejaron en el desarrollo de este informe.

Y por último quiero agradecerle a todos mis compañeros del instituto de la carrera de ingeniería nuclear con orientación en aplicaciones por cada momento compartido dentro y fuera del instituto.

Gracias por todo! Catalina

Resumen

El objetivo de la seguridad nuclear plantea el hecho de que resulta fundamental concebir un diseño que garantice la protección de las personas, la sociedad y el medio ambiente frente a los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes logrando un alto grado de confianza en el diseño. Para lograrlo el análisis se centra en aquellos sucesos o fallos de sistemas y/o componentes que lleven a la planta a un estado anormal en su funcionamiento. Para ello se hace uso de dos enfoques complementarios entre si, el enfoque determinista y el enfoque probabilista. En particular, para este informe se tomó como caso de análisis el LOOP del RA-10, y se hizo uso del enfoque determinista para analizar por un lado el estado de la planta en condiciones normales de funcionamiento en estado estacionario. Y por otro lado se analizó el LOOP en el caso de un transitorio específico, analizando la sensibilidad del sistema frente a cambios en un dado componente del sistema, es decir, en el volante de inercia de la bomba del SPTC. En el caso del análisis del estado estacionario, se consideró la configuración en modo rampa, para un dado perfil de potencia constante en el tiempo. En consecuencia se pudo observar que los resultados obtenidos, en comparación con los cálculos hechos por el código RELAP (datos de los informes de seguridad) resultaron ser muy similares puesto que la variación en la temperatura central del combustible entre uno y otro resultó ser de ± 86 °C; y en la temperatura de pared de vaina se llegó a una diferencia de ± 5 °C.

En el caso del transitorio, se simuló un LOFA con el código de cálculo RELAP, evaluando la evolución del sistema frente al evento. En el análisis se pudo observar una falla en la válvula clapeta (no apertura de la válvula) y el comienzo del evento a los 200 segundos de la simulación. Luego, se analizó la sensibilidad del sistema frente a cambios en la inercia de la bomba, llegándose a la conclusión mediante el análisis del CHF_r que el uso de grandes volantes de inercia no son convenientes, siendo más adecuado el uso de un volante de $1\text{kg}/\text{m}^2$, puesto que la evolución de dicho ratio resulta ser muy similar. Por último se analizó la influencia del intervalo de tiempo seleccionado para el cálculo y los resultados obtenidos, en dicho análisis se pudo observar la importancia de seleccionar un intervalo de tiempo adecuado, en términos de la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Palabras clave: LOOP, análisis determinista, estado estacionario, transitorio, bomba, volante de inercia.

Abstract

Nuclear safety raises the fact that it is essential to make a design that guarantees the protection of people, society and the environment against the harmful effects of ionizing radiation, achieving a high degree of confidence in the design. To achieve this the analysis focuses on those events or system failures that lead the plant to an abnormal state in its operation. For this, two complementary approaches are used, the deterministic approach and the probabilistic approach.

In particular, for this report the LOOP of the RA-10 was taken as the case of analysis. The deterministic approach was used to analyze the state of the plant under normal conditions of steady-state operation. On the other hand, the LOOP was analyzed in the case of a specific transient, analyzing the sensitivity of the system to changes in a given component of the system, that is, in the flywheel of the SPTC pump.

In the case of the steady state analysis, the ramp-mode configuration was considered, for a given power profile constant over time. Consequently, it was observed that the results obtained, in comparison with the calculations made by the RELAP code, turned out to be very similar since the variation in the central temperature of the fuel between one and the other was ± 86 °C; and at the cladding wall temperature a difference of ± 5 °C was reached.

In the case of the transient, a LOFA was simulated with the calculation code RELAP, evaluating the evolution of the system in front of the event. In the analysis it was possible to observe a fault in the valve clapeta (no opening of the valve) and the beginning of the event at 200 seconds of the simulation. Then, the sensitivity of the system to changes in the inertia of the pump was analyzed, reaching the conclusion through the analysis of CHF_r , that the use of large flywheels of inertia are not convenient, being more appropriate the use of a $1\text{kg}/\text{m}^2$ flywheel, since the evolution of given ratio turns out to be very similar. Finally, the influence of the time interval selected for the calculation and the results obtained was analyzed. In this analysis, it was possible to observe the importance of selecting an adequate time interval, in terms of the reliability of the results obtained.

Keywords: LOOP, deterministic analysis, stationary/steady state, transient, pump, flywheel

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Lista de abreviaturas	XIV
1. Capítulo 1	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Motivación y Objetivos	8
2. Capítulo 2	10
2.1. Descripción del proyecto y los sistemas involucrados	10
2.1.1. El LOOP del reactor	10
2.1.2. El módulo de irradiación	11
2.1.3. El sistema principal de transporte de calor	13
2.1.4. Sistema pasivo de refrigeración de parada del LOOP	15
3. Capítulo 3	19
3.1. Análisis de seguridad	19
3.2. Análisis determinista de seguridad	21
3.3. Eventos iniciantes utilizados en el LOOP	22
3.4. Pérdida de suministro eléctrico	22
3.5. Curva de Nukiyama	23
3.5.1. Sin convección forzada	24
3.5.2. Convección forzada	26
4. Capítulo 4	28
4.1. Análisis del estado estacionario del MI en modo rampa	28
4.1.1. Introducción	28
4.1.2. Objetivo del capítulo	29
4.1.3. Marco teórico	30

4.1.4.	Análisis del caso y resultados obtenidos	33
4.1.5.	Análisis y Discusiones	37
5.	Capítulo 5	39
5.1.	Descripción del código de cálculo	39
5.2.	Esquema de la nodalización	40
6.	Capítulo 6	43
6.1.	Análisis de un evento iniciante en el DEEN-LOOP y el impacto de distintos volantes de inercia en la evolución del mismo	43
6.1.1.	Análisis de la sensibilidad del sistema de refrigeración en un caso ac- cidental para distintos volantes de inercia	44
6.1.2.	Análisis de la evolución del flujo de calor	54
6.1.3.	Análisis del evento en el combustible en términos del flujo de calor y su variación para distintos volantes de inercia	60
6.1.4.	Análisis y Discusiones	61
7.	Capítulo 7	64
7.1.	Conclusiones	64
A.	Anexo: Interpretación y ejecución de un input en RELAP	68
A.1.	Componentes hidro dinámicos	68
A.1.1.	Time Dependent Volume (TMDPVOL - TDP) - Volumen dependiente del tiempo	68
A.1.2.	Time Dependent Junction (TMDPJUN) - Unión dependiente del tiempo	70
A.1.3.	Single Volume (SNGLVOL) – Volumen simple	71
A.1.4.	Single Junction (SNGLJUN) – Unión simple	72
A.1.5.	Pipe - Tubería	73
A.1.6.	Valve - Válvula	74
A.1.7.	Branch - Distribuidor	75
A.2.	Estructuras de calor	76
A.2.1.	Cómo definir una estructura de calor	76
A.2.2.	Información contenida dentro de la tarjeta “Estructura de calor” 1CCCG000	77
A.2.3.	Indicador de malla de estructura de calor - Heat Structure Mesh Flags - 1CCCG100	79
A.2.4.	Formato para el número de intervalos de malla, 1CCCG101-G199 . .	79
A.2.5.	Datos de la composición de la estructura de calor, 1CCCG201-G299 .	80

A.2.6. Datos de la distribución de fuente de la estructura de calor, 1CCCG301-G399	80
A.2.7. Formato para ingresar datos de temperatura iniciales, 1CCCG401-99	81
A.2.8. Condición de límite izquierdo o condición de borde, 1CCCG501-599 .	81
A.2.9. Condición de límite derecho, 1CCCG601-G699	84
A.2.10. Datos de la fuente, 1CCCG701-G799	86
A.2.11. Formato de 9 palabras para el Límite izquierdo adicional, 1CCCG801-G899	88
A.2.12. Formato de 9 palabras para el Límite derecho adicional, 1CCCG901-G999	89

Bibliografía	90
---------------------	-----------

Lista de abreviaturas

En esta sección se detallaran las abreviaturas y terminologías utilizadas a lo largo del informe.

Abreviaturas

Abreviatura	Término
BBCC	Barras Combustibles
BC	Barra Combustible
CC	Es el Canal Caliente y representa el volumen de refrigerante calefaccionado por la BC de mayor potencia. Al ser el canal más exigido, desde el punto de vista de la refrigeración, se lo utiliza para calcular los márgenes críticos.
CP	Es el Canal Promedio y representa el volumen de refrigerante calefaccionado por las 2 BC restantes.
EC	Elemento Combustible
IC	Intercambiador de Calor
LOFA	Loss of Flow Accident (Evento de pérdida de refrigeración)
DEEN-LOOP o LOOP	Dispositivo experimental de irradiación de barras combustibles (incluye todos los sistemas y dispositivos que lo componen)
MI	Módulo de Irradiación del LOOP (representa la zona en donde se encuentran las barras combustibles a ensayar/irradiar)
SPARPL	Sistema Pasivo de Refrigeración de Parada del LOOP
SPTC	Sistema Primario de Transporte del Calor

1. Capítulo 1

1.1. Introducción

En este primer capítulo se dará una introducción que permitirá situarnos en el de caso de interés y hacer mención de su importancia en el contexto nacional e internacional.

En particular para el desarrollo de éste trabajo final, se optó por el proyecto del reactor de investigación multipropósito RA-10, haciendo hincapié en el análisis determinístico de seguridad (ADS) aplicado a un evento particular.

El RA-10 o reactor de investigación multipropósito RA-10 es un proyecto de reactor de producción e investigación que tiene como principal objetivo aumentar la capacidad de producción del país en materia de radioisótopos de uso medicinal y fundamentalmente de Mo-99, cuya producción se lleva a cabo actualmente en el reactor argentino RA-3 en el Centro Atómico Ezeiza (CAE). Además de cubrir la creciente demanda a nivel nacional, el aumento en la producción de Mo-99 permitirá que la Argentina pueda posicionarse en el mercado internacional, cubriendo hasta un 10 % de la demanda mundial y permitiendo al país posicionarse a nivel internacional.

Por otra parte, el RA-10 pretende también ser capaz de reemplazar al RA-3 en el futuro en términos de producción cuando éste llegue al final de su vida útil.

El proyecto surge a partir de la declaración conjunta firmada en 2010 entre Argentina y Brasil. En donde se reconoce la necesidad de la cooperación mutua de ambos países para el desarrollo de los dos proyectos de reactor multipropósito. Esto se debe fundamentalmente a las similitudes que presentan tanto el proyecto de Brasil (Reactor Multipropósito Brasileiro, RMB) como el de Argentina (Reactor de investigación multipropósito RA-10).

A partir de marzo de ese mismo año se iniciaron las tareas de identificación de los proyectos de cooperación bilateral, dichas tareas pretendían la identificación de los recursos humanos, tecnológicos y financieros en cuestión, así también como el papel que juegan las industrias

nacionales de ambos países, con la finalidad de promover la cooperación entre Argentina y Brasil para la construcción de ambos reactores. El proyecto argentino, además, hace un fuerte hincapié en el empleo de empresas nacionales para la construcción del reactor, previendo que se reciba más de un 80 % de aporte de empresas e instituciones del país.

El 3 de junio del 2010 mediante la resolución n°200/10, la presidencia de CNEA resolvió iniciar el proyecto de diseño, construcción y puesta en marcha del reactor RA-10. Estimando que su construcción finalizará en marzo del 2020 y previendo obtener la licencia de operación a fines de ese mismo año.

En términos del proyecto, es importante destacar que la instalación además de estar diseñada para la producción de radioisótopos de uso medicinal, contará también con una serie de facilidades que estarán equipadas de forma tal que permitan el desarrollo de distintas áreas de investigación en torno al uso de distintas técnicas neutrónicas. De esta forma el reactor permitirá no solo un crecimiento en términos de producción sino también en términos tecnológicos y científicos.

Es por ello, que el recinto del reactor contará también con una facilidad que permita el estudio y ensayo de combustibles de centrales de potencia. Este dispositivo en particular, es el denominado DEEN-LOOP o LOOP, y se encontrará ubicado en el tanque del reflector del reactor. El desarrollo de este trabajo integrador estará focalizado en el análisis de este dispositivo con un enfoque particular en términos de lo que se denomina análisis determinista de seguridad [1] [2].

1.2. Antecedentes

A lo largo del tiempo la Argentina ha adquirido una gran experiencia en la construcción y operación de reactores nucleares. En la actualidad cuenta con una serie de reactores que cumplen distintos objetivos, entre ellos satisfacen las necesidades producción de radioisótopos, generación energía y de investigación.

La Argentina cuenta actualmente con seis reactores de investigación y/o producción, y tres reactores de potencia. Entre ellos se encuentran:

- **El reactor argentino RA-0:** Este reactor, ubicado en la capital de Córdoba, es una instalación cedida en calidad de préstamo por la CNEA a la Universidad Nacional de Córdoba, con la finalidad de servir como apoyo para la formación de profesionales e investigadores. El mismo fue emplazado en la provincia en el año 1969 cuando la provincia y CNEA firman el convenio correspondiente.

Dicho reactor es un reactor de potencia cero, es decir su potencia es del orden de 1watt, lo que implica que no requiere de un sistema de refrigeración, debido a que el calor producido por el núcleo es muy bajo. Los elementos combustibles están compuestos por una mezcla en peso de 70 % de óxido de uranio enriquecido al 20,09 % en uranio-235, 15 % de brea aglutinante y 15 % de grafito. Como moderador se usa agua liviana des mineralizada.

Tras la puesta en marcha de la Central Nuclear Embalse, el plantel de profesionales que componía el RA-0 fue captado por la nueva central, provocando que este último dejase de operar en 1974.

Más tarde, en 1977 el gobierno de Perú y Argentina firman un convenio por el cual la CNEA les suministro un reactor de potencia cero (RP-0), por tal motivo, el núcleo del RA-0 permaneció en Perú durante 11 años en el RP-0 hasta su retorno a la provincia de Córdoba en 1990. Hoy en día es empleado por docentes y científicos de ámbito universitario y es utilizado para desempeñar actividades de capacitación en temas relativos al área nuclear [3].

- **Reactor Argentino RA-1:** En 1957 Argentina comienza las negociaciones con EEUU para la compra de un reactor de investigación tipo Argonaut. Más tarde, se optó por la idea de construir un reactor de índole nacional, con lo cual se inició su construcción en el Centro Atómico Constituyentes, en la provincia de Buenos Aires, demorando en periodo de 8 meses en su construcción. Alcanzo la criticidad en enero de 1958. En ese año Argentina se posiciono como el primer país en realizar tal hazaña.

El RA-1 es un reactor con una potencia autorizada de 40kW térmicos que posee un núcleo de uranio enriquecido al 20 %. Posee un reflector de grafito, y se encuentra moderado y refrigerado por agua liviana des mineralizada. En el mismo se produjeron los primeros radioisótopos destinados a los fines médicos e industriales, constituyendo la base de los conocimientos y experiencias adquiridos que permitieron más tarde el desarrollo y construcción de los reactores RA-3 y RA-6. También permitió la formación de profesionales para los tres reactores de potencia argentinos.

A lo largo de su vida, el reactor sufrió algunas modificaciones, encontrándose aún en

funcionamiento en la actualidad [4].

- **Reactor Argentino RA-3:** A fines de 1967 se pone en marcha el reactor RA-3 en el Centro Atómico Ezeiza en Buenos Aires con una potencia de 0,5MW con el objetivo de abastecer al mercado nacional con la producción de radioisótopos de uso medicinal. A lo largo de los años, el reactor sufrió una serie de modificaciones técnicas que permitieron que en el 2003, tras obtener la licencia por parte de la Autoridad Regulatoria Nuclear, alcanzase una potencia de 10MWt.

El reactor es un reactor de producción e investigación, que produce principalmente Mo-99 para consumo nacional en medicina nuclear, exportando a su vez, parte de lo producido a Brasil, satisfaciendo las demandas del mercado nacional e internacional.

El reactor cuenta con un flujo neutrónico de 1×10^{14} neutrones/cm²seg. Como combustible utiliza mini placas de uranio y aluminio al 20 % de enriquecimiento (LEU) tipo MTR. El refrigerante y el moderador están constituidos por agua liviana; consta de cuatro barras de control (de plata, indio y cadmio); y posee distintas facilidades de irradiación, entre ellas, 6 cajas de irradiación, 4 haces horizontales (uno tangencial) y una columna térmica [5].

- **Reactor Argentino RA-4:** Al igual que el RA-0, el RA-4 es un reactor cedido en calidad de préstamo por la CNEA a la Universidad Nacional de Rosario, con el mismo objetivo, es decir, formar a profesionales en el campo nuclear y las ciencias básicas asociadas. Este reactor constituye al igual que el reactor de Córdoba, un reactor de los denominados de potencia cero, el cual no requiere de un sistema de refrigeración. El Reactor Nuclear Siemens SUR 100 fue donado por la República Federal Alemana en noviembre de 1969, se instaló inicialmente en el Centro Atómico Constituyentes en 1971, año en que se puso a crítico por primera vez, y fue justamente allí en donde iniciaron las tareas de capacitación de sus operarios. Más tarde, en octubre de 1972, el reactor es trasladado a Rosario, en donde meses después fue puesto a crítico nuevamente. Hoy en día, el mismo continúa en pleno funcionamiento, siendo objeto de uso para fines educativos, de investigación y brindando servicios a terceros [6] [7].
- **Reactor Argentino RA-6:** El reactor argentino RA-6, fue el primer reactor argentino diseñado y construido íntegramente en la Argentina a cargo de INVAP, el mismo fue inaugurado en 1982 en la provincia de Río Negro en San Carlos de Bariloche en el Centro Atómico Bariloche. El mismo fue diseñado como un reactor multipropósito

de pileta con una potencia de 1MW de potencia térmica. Inicialmente su núcleo estaba compuesto por combustibles tipo MTR (mini placas de U-Al -“meat”) de uranio altamente enriquecido (HEU), pero en 1978, como parte del programa “Global threat reduction” o “programa internacional de reducción de enriquecimiento para reactores de investigación”, la Argentina decidió pasar de un núcleo HEU a uno LEU (de bajo enriquecimiento).

En 2002, se acondicionó uno de sus bunkers para los procesos de investigación en tratamiento de oncología por BNCT (terapia por captura de neutrones en Boro).

El RA-6 ha afrontado varias modificaciones en su diseño a lo largo de su vida, hoy en día se caracteriza por ser un reactor multipropósito de pileta abierta, con una potencia de 1MW térmico que funciona con uranio de bajo enriquecimiento (al 20 %) en U-235, el combustible es del tipo MTR de siliciuro de uranio, refrigerado y moderado por agua liviana des mineralizada, con reflector de grafito. El mecanismo de refrigeración en el primario y secundario se lleva a cabo mediante la convección forzada por agua. Consta de cuatro barras de control grueso (de cadmio, indio y plata) y una barra de control fino de acero.

Además, para sus diversas actividades de formación, investigación, y docencia entre otros, consta de cinco haces de irradiación radiales, dos posiciones de irradiación dentro del núcleo, un sistema de transporte neumático y una celda caliente [8] [9].

- **Reactor Argentino RA-8:** El reactor argentino RA-8, fue diseñado y construido por INVAP para la CNEA con el fin de realizar las pruebas de testeo necesarias para el núcleo del reactor CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares). El mismo operó entre 1997 y 2001 en la provincia de Río Negro en Pilcaniyeu. Su diseño consiste en un reactor de pileta abierta de baja potencia (10 watts de potencia térmica, con un máximo de 100 W en plena operación) refrigerado por convección natural, destinado fundamentalmente a comprobar la calidad del diseño de los elementos combustibles y del diseño del núcleo en un modelo físico a escala real. Los elementos de control del CAREM, destinados a absorber excesos de neutrones, también fueron también testeados en el RA-8 [10].

A su vez, la Argentina cuenta con tres reactores de potencia, cuya operación se encuentra a cargo de NA.SA (Nucleoeléctrica Argentina Sociedad Anónima); ellos son:

- **Reactor Nuclear Atucha I:** Este reactor, emplazado a 100 km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, en la localidad de Lima, partido de Zárate, comenzó su funciona-

miento en 1974, y fue construido por la firma SIEMENS KWU bajo un contrato del tipo “llave en mano”.

Es un reactor del tipo PHWR (reactor de agua presurizada – Recipiente de presión SIEMENS), moderado y refrigerado por agua pesada (D₂O). Los combustibles consisten en un arreglo de pastillas cerámicas de UO₂ sinterizadas dispuestas de forma vertical en tubos de Zircaloy en un arreglo circular constituyendo lo que se denomina comúnmente como elemento combustible. Los combustibles consisten en una mezcla de uranio natural (0,72 %) y uranio levemente enriquecido al 0,85 %. El núcleo consta de 252 posiciones con canales refrigerantes, con una potencia eléctrica bruta de 362MWe, y una potencia térmica de 1179MWt [11].

- **Reactor Nuclear Atucha II:** La central nuclear Atucha II, se encuentra emplazada en el mismo predio de la central nuclear Atucha I. Su proyecto comenzó en 1982, y estuvo paralizado entre 1994 y 2006. En 2006, con la reactivación del plan nuclear argentino, el proyecto volvió a activarse permitiendo que en junio del 2014 el reactor alcanzara su primera criticidad incorporando su generación al sistema interconectado nacional. El modelo de reactor es similar al de Atucha I (del tipo PHWR - recipiente de presión), refrigerado y moderado por agua pesada.

La misma posee una potencia eléctrica bruta de 745MWe, y una potencia térmica de 2175MWt [12].

- **Reactor Nuclear Embalse:** La central nuclear embalse posee un modelo distinto al de las Atuchas, es del tipo CANDU. En orden cronológico, es la segunda en construirse de nuestro país, y se encuentra situada en la costa sur del Embalse del Río Tercero, provincia de Córdoba. El sistema primario en lugar de tener un recipiente de presión, mantiene a los combustibles dentro de tubos de presión. Como combustible utiliza uranio natural y su refrigerante y moderador es agua pesada. Su diseño es distinto al de las Atuchas, ya que los tubos de presión se encuentran en forma horizontal dentro de un recipiente especial denominado calandria. El modo de funcionamiento también es distinto, ya que posee un recambio diario de combustibles. Además, esta central se caracteriza por producir el Co-60 que abastece a la PISI en el Centro Atómico Ezeiza.

La misma cuenta con 380 canales en el tubo de calandria que están siendo reemplazados en la actualidad (año: 2017-2018), como así también los generadores de vapor, en el marco “proyecto de extensión de vida” de la central.

La central posee una potencia eléctrica bruta de 648 MWe y una potencia térmica de

2109MWt [13].

Además de los reactores construidos, la Argentina cuenta con dos proyectos muy importantes a nivel nacional, siendo uno de ellos foco de análisis de este proyecto final. Entre los proyectos mencionados se encuentran:

- **Proyecto CAREM:** El proyecto CAREM25 consiste en la construcción y diseño de un reactor íntegramente argentino del tipo SMR (“Small Modular Reactor”). El proyecto pretende reafirmar la capacidad del país en el desarrollo y puesta en marcha de centrales nucleares, y posicionarlo a nivel internacional como un competidor en el mercado de los reactores modulares de baja y media potencia. Su construcción comenzó en febrero del 2014, siendo el primer SMR oficialmente en construcción en el mundo. El mismo se encuentra emplazado en Lima, provincia de Buenos Aires y será capaz de generar una potencia de 32 MWe.

Se prevé que alrededor del 70 % de los insumos, componente y servicios requeridos para la obra sean provistos por el mercado nacional, cumpliendo con las exigencias de los estándares de calidad internacionales supervisados por CNEA.

En paralelo con este proyecto, la CNEA avanza en el desarrollo de reactor modular CAREM, que dispondrá de una potencia de 120 MWe y permitirá su comercialización a nivel internacional, alcanzando costos competitivos que le permitirán ganar posición en el mercado. Este tipo de reactores resultan, además, muy útiles en relación al abastecimiento de aquellas zonas que se encuentran muy alejadas de los grandes centros urbanos o para polos fabriles e industriales con un gran consumo de energía. Es por ello, que es uno de los proyectos que hoy en día se consideran de gran importancia en CNEA [14].

- **Proyecto RA-10:** El proyecto reactor nuclear argentino multipropósito RA-10, se localiza en el Centro Atómico Ezeiza, y comenzó su construcción en el año 2016, previéndose su puesta en marcha para el segundo semestre del 2020. Su objetivo principal será aumentar la producción de la Argentina en materia de radioisótopos para uso médico a nivel nacional, permitiendo a su vez que el país se posicione a nivel internacional cubriendo parte de la demanda de América Latina.

El proyecto pretende a su vez ampliar las capacidades de investigación y desarrollo tecnológico, además de hacer uso de aplicaciones basadas en el uso de técnicas neutrónicas

(dentro del marco proyecto LAHN). El proyecto se lleva en conjunto con INVAP, quien se encarga de llevar adelante el diseño, fabricación y provisión de componentes. CNEA por su parte, es la encargada de capacitar y formar a los futuros operadores del reactor, avanza en la generación de distintos proyectos que permitan aprovechar al máximo las posibilidades que brindará la nueva instalación, además de intervenir en distintas partes de proyecto, entre ellas, en el desarrollo del DEEN-LOOP que se instalara en el núcleo del reactor.

En el marco de este nuevo proyecto la CNEA pretende recibir más del 80 % de aporte de empresas e instituciones del país [1] [2].

1.3. Motivación y Objetivos

Independientemente del objetivo por el cual fue construido un dado reactor, sea este de investigación, producción o de potencia, es muy importante que en el diseño se contemple el análisis de riesgo asociado a la instalación. Hoy en día, en función de todos los sucesos que acontecieron en el mundo a lo largo de la historia, se vuelve imprescindible el hecho de realizar los estudios de seguridad correspondientes, demostrando de esta forma que la instalación es inherentemente segura y capaz de soportar cualquier evento que pueda acontecer a la misma.

Para ello se hace uso de dos enfoques muy importantes en seguridad nuclear, el enfoque probabilístico y el enfoque determinístico. Ambos enfoques son complementarios entre sí, y constituyen una herramienta fundamental para demostrar la seguridad de la planta y permitir su licenciamiento.

En particular este informe se basa en el uso del enfoque determinista para el análisis del LOOP del reactor RA-10 en distintas condiciones. A lo largo de este proyecto integrador, se desarrollaran una serie de herramientas que permitirán analizar el dispositivo tanto en condiciones normales en estado estacionario como en el caso de un transitorio. Y permitirán a su vez, realizar un análisis crítico respecto de las herramientas de cálculo utilizadas para el licenciamiento y simulación de planta en cualquiera de las condiciones mencionadas.

El objetivo de este informe es por un lado corroborar de forma analítica, para el caso estacionario, que los resultados obtenidos por el código se condicen con los resultados analíticos calculados. Y una vez corroborado esto, se pretende analizar, mediante el uso del código, la

evolución de un transitorio dado. En el análisis mencionado se pretende variar algún parámetro del sistema y realizar un análisis de sensibilidad del mismo frente a los cambios insertados y de respuesta del código en términos de su capacidad para resolver cada caso planteado.

2. Capítulo 2

2.1. Descripción del proyecto y los sistemas involucrados

En junio del 2010 la Comisión Nacional de Energía Atómica (resolución n°200/10) resolvió iniciar el proyecto de diseño, construcción y puesta en marcha del reactor RA-10.

Este proyecto consiste en un reactor multipropósito emplazado dentro del predio del Centro Atómico Ezeiza, cuyo objetivo fundamental es la producción de radioisótopos de uso medicinal a fin de expandir el mercado tanto a nivel nacional como internacional. Sin embargo, este no es el único objetivo del proyecto. En el reactor se pretende, además, instalar una serie de facilidades que permitirán la ejecución de distintos trabajos científicos de investigación mediante la implementación de haces de neutrones e irradiación de muestras. Contemplando desde el diseño, la instalación de un dispositivo en el tanque del reflector del reactor destinado a la irradiación de barras combustibles de reactores de potencia (en operación, en construcción y proyectadas en el país) sometidas a distintas condiciones de presión, temperatura y químicas del refrigerante.

Este dispositivo se denomina LOOP, y el objetivo de este informe se centra en el análisis del mismo tanto en condiciones normales de operación como en condiciones accidentales. Para ello, en este capítulo, se pretende dar una idea general del funcionamiento del dispositivo y las distintas partes que lo componen, a fin de poder comprender los fenómenos que se desarrollan dentro del mismo tanto en situaciones normales como anormales.

2.1.1. El LOOP del reactor

El DEEN LOOP o LOOP es un dispositivo experimental que será ubicado en una posición específica en el tanque del reflector. El mismo consiste en una estructura que permitirá alojar al módulo de irradiación con el objetivo de realizar los ensayos correspondientes y permitiendo la regulación de la potencia para la simulación de rampas de potencia (según lo requiera el ensayo), a fin de estudiar el comportamiento de los elementos combustibles bajo distintas

condiciones.

El dispositivo estará diseñado de forma tal que, permitirá variar las condiciones de irradiación, tales como la presión, la temperatura y las condiciones químicas del refrigerante.

El objetivo del DEEN es realizar ensayos tanto a potencia constante como a potencia variable. Para ello, el mismo será diseñado con dos configuraciones de irradiación distintas:

- **Configuración en *Modo Base*:** Consiste en un arreglo triangular de tres barras combustibles. Esta configuración es la que se utilizará para los ensayos de quemado, puesto que la potencia se mantiene constante para la misma (La potencia lineal a la cual estarán sometidas estas BC será entre 200W/cm y 500W/cm, pudiendo tener un tiempo de residencia en el reactor de hasta 3 años a plena potencia.).
- **Configuración en *Modo Rampa*:** Consistente en una única barra combustible con un canal de refrigeración concéntrico. Esta configuración se caracteriza por poseer un dispositivo especial en la zona útil del MI denominado *Sistema de Venenos Líquidos Externo o SVLE*, este dispositivo es el encargado de regular las rampas de potencia y proveerá las condiciones para un estado de convección natural del dispositivo, aún a plena potencia. Es importante mencionar que las mismas se ejecutarán siempre de forma creciente (rampa positiva) en un rango de potencia lineal entre 200 W/(cm.min) y 600 W/(cm.min).

2.1.2. El módulo de irradiación

El módulo de irradiación representa la zona en donde se encuentran las barras combustibles a ensayar. Consiste en un único elemento combustible que se inserta de forma vertical en la facilidad del reactor denominada LOOP.

La función de este elemento es simular un modelo de un elemento combustible de una dada central nuclear de potencia siendo sometida a distintas condiciones de irradiación.

El MI posee dos tipos de configuraciones de ensayo, cuyas principales diferencias de diseño se encuentran en la zona útil de cada elemento.

Por un lado, se tiene la configuración n°1, denominada “Modo Base”, esta consiste en un arreglo triangular de tres BC sometidas a una potencia constante con el objetivo de evaluar el quemado. Y por otro lado, se tiene la configuración n°2, denominada “Modo Rampa”, que

consiste en una única BC. Esta configuración se utiliza para evaluar el comportamiento de los combustibles frente a rampas de potencia variables mediante un sistema de camisa de venenos líquidos SVLE.

El objetivo fundamental de este componente, es permitir el ensayo de un EC, sometido a distintas condiciones de irradiación, a fin de analizar su comportamiento y el de las estructuras relacionadas. Cabe mencionar que para ello el MI, en sus dos configuraciones, dispondrá del instrumental adecuado conforme al ensayo para la medición de los distintos parámetros de interés. En la Figura 2-1 se puede observar mas en detalle la estructura de dicho dispositivo.

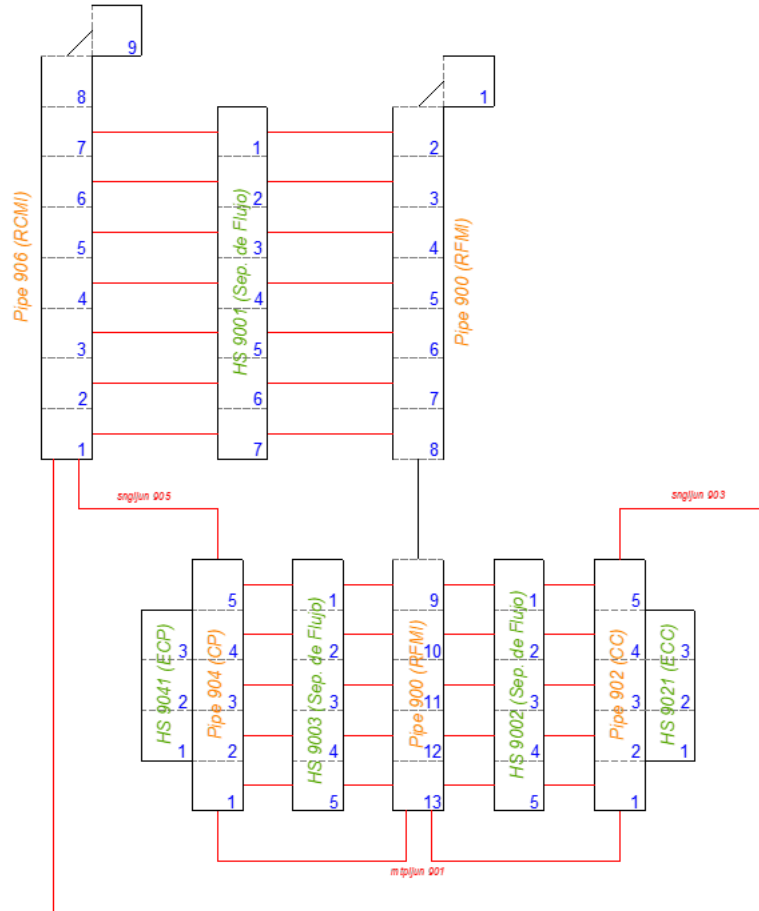


Figura 2-1.: Esquema de la nodalización del MI para RELAP [15]

El MI se encuentra formado por dos componentes hidrodinámicos y una estructura de calor [15]:

- Componentes tipo Pipe:
 - Componente 900, representa la rama fría que ingresa al MI
 - Componente 902, representa el CC
 - Componente 904, representa el CP
 - Componente 906, representa la rama caliente que egresa del MI.
- Un componente tipo MtplJun, encargado de distribuir el caudal proveniente de la rama fría hacia los canales del MI.
- Cinco estructuras de calor:
 - Componentes 9021 y 9041, representan la zona activa de las BBCC conectadas a los canales de refrigerante, y poseen una distribución de potencia cosenoidal.
 - Componentes 9001, 9002 y 9003, representan al tubo separador de flujos en diferentes zonas.

2.1.3. El sistema principal de transporte de calor

El SPTC esta constituido por el conjunto de tuberías, bombas, válvulas e intercambiadores de calor, destinados al transporte del fluido y refrigeración del MI. El esquema de la nodalización en donde se puede ver con mas claridad el SPTC y sus interacciones en el dispositivo, se encuentra en el Capitulo 5 (Figuras 5-1 y 5-2).

Cabe mencionar que en el análisis se considera que las tuberías del SPTC no intercambian calor con el medio. El SPTC solamente puede evacuar la potencia generada por las BBCC a través de su intercambiador de calor.

Para este informe nos centraremos en el análisis del MI y su evolución tanto en condiciones normales como anormales, y en particular en el rol que cumple la bomba de impulsión y el volante de inercia del SPTC. Debido a la importancia de este último dispositivo en el desarrollo de este informe, es que se le dedicará un apartado aparte a la bomba de impulsión y su volante de inercia.

Bomba de impulsión y volante de inercia

El volante de inercia acoplado a la bomba de impulsión del sistema primario de transporte de calor cumple dos funciones muy importantes desde el punto de vista de la seguridad. Por

un lado, permite retrasar la detención de la bomba, y por el otro lado suaviza la disminución de caudal.

El volante de inercia consiste en un disco rotatorio que se acopla a la bomba con el fin de acumular energía cinética. Esta inercia que le confiere el disco a la bomba, se encuentra relacionada con la masa del disco, y es un factor importante a considerar, puesto que un mayor momento de inercia implica mayor masa, y por ende más energía para ponerlo en funcionamiento, resultando ser no factible desde el punto de vista económico.

Desde el punto de vista del diseño, dimensionar una bomba con volantes de inercia muy grandes para potencias del reactor elevadas resulta contraproducente, puesto que si bien el tiempo que la bomba sigue en funcionamiento desde el corte de suministro de energía es mayor, la confiabilidad del sistema se ve fuertemente afectada en lapsos de tiempo muy largos, debido a que pueden producirse fallas en ese lapso de tiempo.

En general, se busca diseñar bombas con volantes de inercia en donde el coast down (tiempo entre que la bomba dejó de recibir energía eléctrica y el caudal llegó a cero) sea tal que permita la apertura de la clapeta antes de que el caudal llegue a cero. Esto permite la refrigeración por convección natural del sistema hasta que los diesel de emergencia de la planta entren en funcionamiento y restablezcan el sistema.

En la Figura **2-2** se puede observar un esquema típico de una bomba de impulsión con su volante de inercia acoplado.

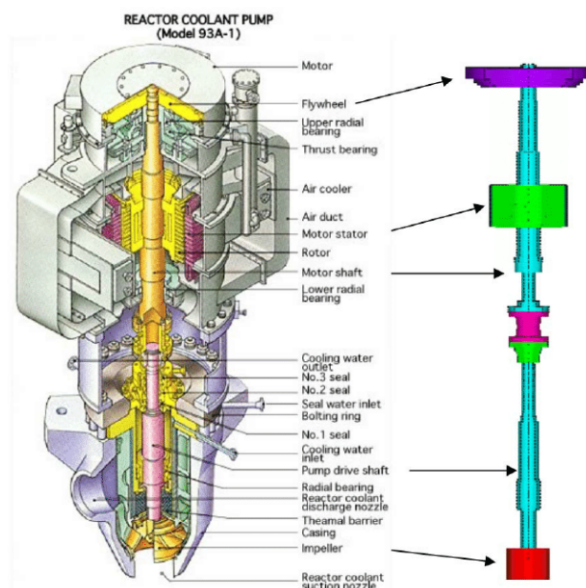


Figura 2-2.: Bomba de impulsión con volante de inercia [16]

2.1.4. Sistema pasivo de refrigeración de parada del LOOP

El SPARPL o sistema pasivo de refrigeración de parada del LOOP es un sistema cuyo objetivo es ser un medio de apoyo a la seguridad en caso de un evento anormal en el sistema-LOOP. En la Figura 2-3 se puede observar, en detalle, la estructura de dicho sistema.

El mismo se encuentra compuesto por una válvula tipo clapeta. Éste elemento cumple la función de regular el funcionamiento del sistema, permitiendo la convección natural del módulo de irradiación una vez superado un dado diferencial de presión entre el tubo disipador de calor y el tramo 1 de la interfaz; siendo dicho valor igual a unos 600 Pa.

Cuando se supera la diferencia de presión mencionada, la válvula se abre dejando pasar el fluido proveniente de la rama caliente hacia el tramo en donde se encuentra el tubo disipador de calor. El fluido consecuentemente cede gran parte del calor a dicha estructura e ingresa, a través de la clapeta, nuevamente al circuito del módulo de irradiación a través de la rama fría del mismo. En consecuencia, se produce la refrigeración del mismo mediante convección natural.

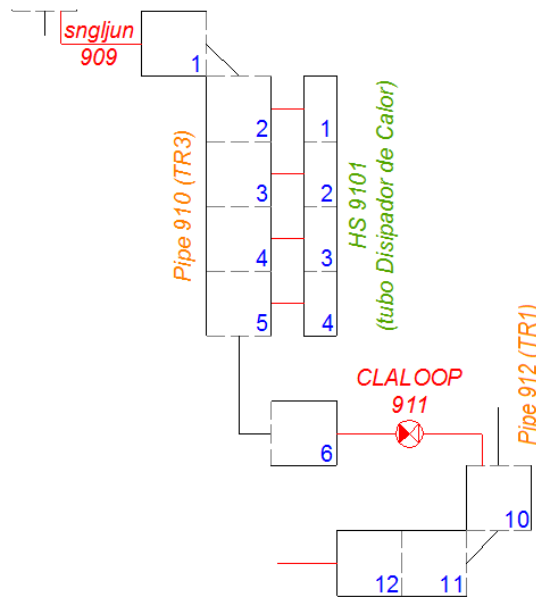


Figura 2-3.: Sistema Pasivo de Refrigeración de Parada del LOOP - SPARPL [15]

El SPARPL se encuentra formado por tres componentes hidrodinámicos y una estructura de calor que constituye el tubo disipador de calor:

- Componente 900, representado por una Sngljun, cumple la función de conectar el componente Pipe con el resto del sistema del LOOP.
- Componente 910, representa el Pipe propiamente dicho, y se encuentra conformado por seis volúmenes hidrodinámicos.
- Componente 911, es un componente tipo Valve, y representa una válvula tipo clapeta (en el esquema se encuentra designada como CLALOO).
- Componente 9101, representa una estructura de calor, más precisamente un tubo disipador de calor.

En la Figura 2-4 se puede observar la distribución de dichos componentes en el esquema de nodalización y como dichos componentes se relación entre sí.

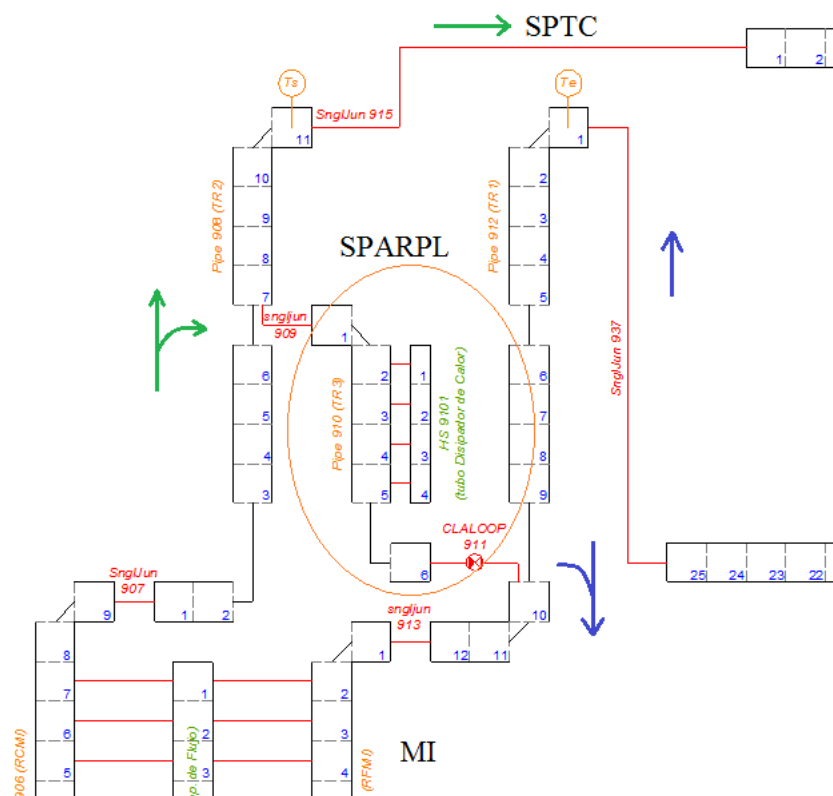


Figura 2-4.: Esquema representativo de la interacción de los sistemas que componen el LOOP [15]

Debido al rol que cumple la válvula tipo clapeta en la seguridad, se decidió dedicarle un pequeño apartado a la misma, que permitirá comprender su funcionamiento y función.

Válvula tipo clapeta

Las clapetas, también llamadas válvulas unidireccionales, son elementos que se interponen en el paso de un fluido permitiendo o no el paso del mismo. Son dispositivos que cumplen la función de obturador, haciendo que el fluido circule en una única dirección. Constituyen sistemas pasivos que se accionan como consecuencia de la acción de una fuerza o presión sobre las mismas.

En el caso de las plantas o centrales nucleares las clapetas cumplen la función de sistemas de seguridad pasivos cuyo objetivo es alivianar la presión en el interior de la vasija del reactor.

Cuando las presiones en el interior de la vasija exceden determinados valores, el vapor es expulsado a través del pasaje que se genera como consecuencia de la apertura de la clapeta. En efecto, el vapor es liberado por el conducto hasta que la presión dentro de la vasija haya alcanzado los valores deseados, y como consecuencia de ello la clapeta se cierra nuevamente por acción de la gravedad. En la Figura 2-5 se puede ver un esquema simplificado de una clapeta genérica [17] [18].

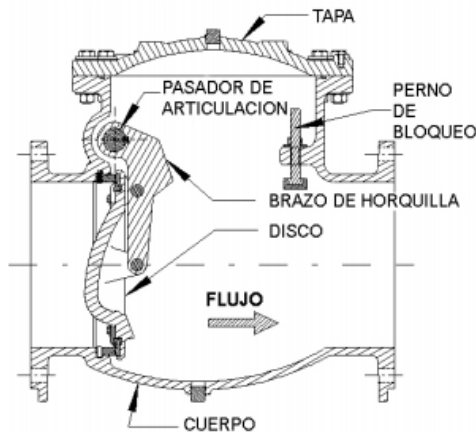


Figura 2-5.: Esquema de válvula tipo clapeta [17]

3. Capítulo 3

3.1. Análisis de seguridad

El objetivo fundamental de la seguridad nuclear es proteger a las personas, la sociedad y el medio ambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. Además, deberá asegurar el cumplimiento de las funciones de seguridad fundamentales de una central nuclear en todos sus estados, las cuales son:

- Control de reactividad
- Refrigeración del combustible
- Confinamiento del material radioactivo

Desde el punto de vista del diseño, es importante lograr que el mismo sea inherentemente seguro, y para ello se debe evitar la generación de accidentes con un alto grado de confianza. En consecuencia, se deben analizar todos los posibles sucesos que pueden acontecer a la planta por más improbables que estos puedan llegar a ser. Esto implica el análisis tanto de aquellos eventos con una probabilidad de ocurrencia muy alta, pero con consecuencias relativamente bajas, como de aquellos eventos con una probabilidad de ocurrencia muy baja, pero que, de ocurrir, poseen una consecuencia muy alta.

En el análisis, se considera que son los fallos de los sistemas y componentes, así como los fallos de error humano, los que inducen a un estado anormal de la planta. Y es por ello, que resulta necesario equipar a la instalación con una serie de dispositivos de protección tales que garanticen la seguridad en la misma. Su objetivo fundamental es evitar que el evento, considerado en las bases del diseño, se produzca, y en caso de que el mismo tenga lugar y evolucione, mitigar sus consecuencias. Así también, se presta suma atención a aquellos que exceden la base de diseño (es decir, eventos poco probables, pero de consecuencias más graves). En función de la importancia de cada sistema o componente en la instalación, se le

otorga a cada uno diferentes clasificaciones en términos de seguridad. En función de ello, se busca que todos aquellos sistemas y componentes que tengan relevancia desde el punto de vista de la seguridad se diseñen conforme a los códigos y normas nacionales e internacionales aplicables, es decir, que sea tecnología aprobada, con el objetivo de garantizar el grado de confiabilidad necesario.

En el ámbito de la seguridad nuclear, se hace referencia a un concepto sumamente importante, y que resulta de gran utilidad en el diseño, que es el concepto de “Defensa en profundidad”. El mismo es un concepto integral que abarca todas las consideraciones a tener en cuenta, tanto en el diseño mismo, como en los aspectos que refieren a la organización y al comportamiento o los procedimientos adoptados según sea el caso.

El concepto se basa en la existencia de una serie de niveles de defensa independientes que tienen como objetivo la prevención de accidentes, y proporcionar una protección adecuada en caso de que la prevención no funcione. Esto incluye tanto equipos y sistemas involucrados como los procedimientos a aplicar en caso de ser necesario.

El concepto se centra en un diseño que consiste en cinco niveles independientes, en donde la falla de un nivel queda contenida dentro del nivel superior siguiente. Los niveles son los que se detallan a continuación:

- **Nivel 1:** La finalidad del primer nivel de defensa es evitar las desviaciones del funcionamiento normal y prevenir los fallos de los sistemas. Ello implica lograr un diseño seguro utilizando códigos y materiales de diseño adecuados haciendo uso de los controles de calidad correspondientes.
- **Nivel 2:** La finalidad del segundo nivel de defensa se lleva a cabo cuando se produce una desviación del estado operacional de la planta, el mismo cumple la función de detectar y controlar el evento iniciante y evitar que degenera en un accidente.
- **Nivel 3:** Si el evento iniciante no es controlado en el nivel 2, y evoluciona a un accidente previsto en el diseño, es el tercer nivel de defensa el encargado de controlarlo para evitar que se genere daño de núcleo.
- **Nivel 4:** Por el contrario, si el evento evoluciona hasta un accidente severo con daño de núcleo, se vuelve imposible volver a la planta a un estado seguro. El nivel 4 de defensa en profundidad, por el contrario, a los anteriores, pretende garantizar la función de

confinamiento, asegurando que las emisiones radiactivas se mantengan en el nivel más bajo como sea razonablemente posible. La principal función es la de mitigación.

- **Nivel 5:** El último nivel tiene lugar cuando las tareas de mitigación no resultan suficientes y se producen emisiones de material radioactivo fuera del emplazamiento de la planta. El nivel 5 pretende cubrir todas las tareas de gestión y procedimientos involucrados, tanto dentro como fuera del emplazamiento, con el fin de mitigar las consecuencias radiológicas.

Hasta el nivel 3 incluido, se pretende que la planta vuelva al estado seguro, sin embargo, si el evento evoluciona hasta un accidente severo con daño de núcleo, son los niveles 4 y 5 los encargados de mitigar el suceso o de tomar las medidas de gestión necesarias para controlar la situación y resguardar al público.

3.2. Análisis determinista de seguridad

Con el objetivo de maximizar el beneficio obtenido de las centrales nucleares y minimizar tanto el costo como los riesgos asociados a la práctica, resulta necesario realizar un análisis de seguridad. En particular se hace uso de dos enfoques, el enfoque determinístico y el enfoque probabilístico, ambos complementarios entre sí.

El enfoque probabilista plantea el hecho de que las condiciones del proceso determinan un universo de posibilidades en términos de los sucesos que pueden llegar a acontecer, y que dichos sucesos se encuentran sujetos a una probabilidad de ocurrencia, en donde el resultado final del proceso será incierto. Mientras que el enfoque determinístico, por su parte, plantea que las condiciones bajo las cuales se desarrolla un suceso van a determinar el resultado asociado. El análisis de seguridad, combina ambos enfoques para el análisis de riesgos asociados a la instalación.

A lo largo del diseño de una instalación nuclear, se vuelve necesario el hecho de evaluar los parámetros de diseño de cada dispositivo de seguridad en términos de su eficacia frente a un accidente. Para ello se hace uso fundamentalmente del análisis determinista de seguridad o ADS, y en particular este informe se va a basar en el uso de este enfoque aplicado a uno de los dispositivos del LOOP.

3.3. Eventos iniciantes utilizados en el LOOP

Los eventos iniciantes son situaciones anormales que pueden ocurrir durante cualquiera de los estados operacionales de la planta. Como consecuencia de ello y en caso de falla en los sistemas de seguridad, los operadores o el público pueden recibir una dosis por encima de los límites permitidos.

Es por ello que desde el diseño se tienen en cuenta estos eventos (eventos iniciantes postulados), en relación a su probabilidad de ocurrencia y las características de la planta. Los mismos son listados y se comparan con la lista de eventos propuesta por la ARN. Es mediante la comparación (empleando “juicio de ingeniería”) que se determina que eventos son posibles en función de las características de la planta.

En particular, para el análisis de seguridad realizado en el LOOP, se plantearon las siguientes familias de eventos:

- Pérdida de suministro eléctrico. A este evento en particular, se le dedicará un apartado especial (**sección 3.4**) ya que el desarrollo del evento a analizar se basa en la ocurrencia de este suceso.
- Refrigeración insuficiente
- Pérdida de sumidero de calor
- Falla de equipo o componentes
- Falla en la instrumentación del sistema de protección del LOOP

Las amenazas internas y externas, al igual que el error humano, tampoco se consideran como eventos iniciantes en sí, sino como causas de otros eventos iniciantes, que además tienen el potencial de afectar funciones de seguridad [19].

3.4. Pérdida de suministro eléctrico

La pérdida del suministro normal de potencia eléctrica se puede generar como consecuencia del corte por parte del proveedor externo (debido a causas externas a la planta) o por una

falla del sistema de suministro general de la instalación. Este evento afecta directamente al reactor y su funcionamiento normal. Con lo cual es un evento importante a considerar en el diseño de una instalación, y es por ello que sus consecuencias serán motivo de estudio en este trabajo.

Una consecuencia de este evento es el LOFA (“Loss of flow accident”) e implica la pérdida de caudal en el sistema de refrigeración debido a la parada de la bomba.

La falta de refrigeración de los EECC es un hecho grave en el reactor que puede conllevar a una situación de accidente. Los EECC generan energía constantemente y por lo tanto calor que es necesario evacuar, tanto para la generación de energía, en el caso de reactores de potencia, como por cuestiones de seguridad en general en cualquier reactor.

Una alteración en el funcionamiento normal del sistema de transporte de calor, como una disminución en el caudal de refrigeración o una redistribución de caudal, puede ocasionar que la temperatura de la vaina se eleve alcanzando valores críticos para el material y consecuentemente la falla de los mismos, llevando a una situación de accidente.

Es por ello que resulta necesario el uso de sistemas y/o dispositivos de seguridad que permitan controlar el evento. En particular, en el diseño del LOOP se optó por el uso de un sistema de seguridad para controlar el evento, denominado SPARPL, detallado en el Capítulo 2 , sección 2.1.4, en donde la función de seguridad es cumplida por la válvula clapeta.

Además de este sistema, se diseñó la bomba del SPTC con un volante de inercia que permite la caída de caudal de forma lenta, dando tiempo a la clapeta del SPARPL para su apertura. El objetivo y detalle del funcionamiento de este dispositivo está detallado en el Capítulo 2, sección 2.1.3 y será objeto especial de análisis en este informe.

3.5. Curva de Nukiyama

Debido a lo expresado anteriormente, es que se vuelve necesario conocer cómo evoluciona un sistema generador de calor como el núcleo de un reactor o un EC frente a eventos en donde la refrigeración se ve alterada.

Esta evolución en los flujos de calor desde la pared de la vaina del EC hacia el fluido refrigerante, puede ser explicada con más claridad a través de la curva de Nukiyama. Para ello

en esta sección se detallará en un primer punto, evolución del flujo de calor para el caso sin convección forzada (Curva de Nukiyama), y luego se describirá como sucede el evento en el caso particular de un conducto por el cual circular un fluido y la refrigeración de la pared del conducto se da mediante convección forzada.

3.5.1. Sin convección forzada

Para la elaboración de la curva de Nukiyama, Figura 3-2 se consideró un alambre de platino calentado eléctricamente.

El flujo de calor desde la superficie del alambre hacia el fluido depende de la diferencia de temperatura entre la superficie del alambre y la temperatura de saturación del fluido, a medida que esta diferencia crece el flujo de calor varia pudiendo generarse la ebullición del fluido.

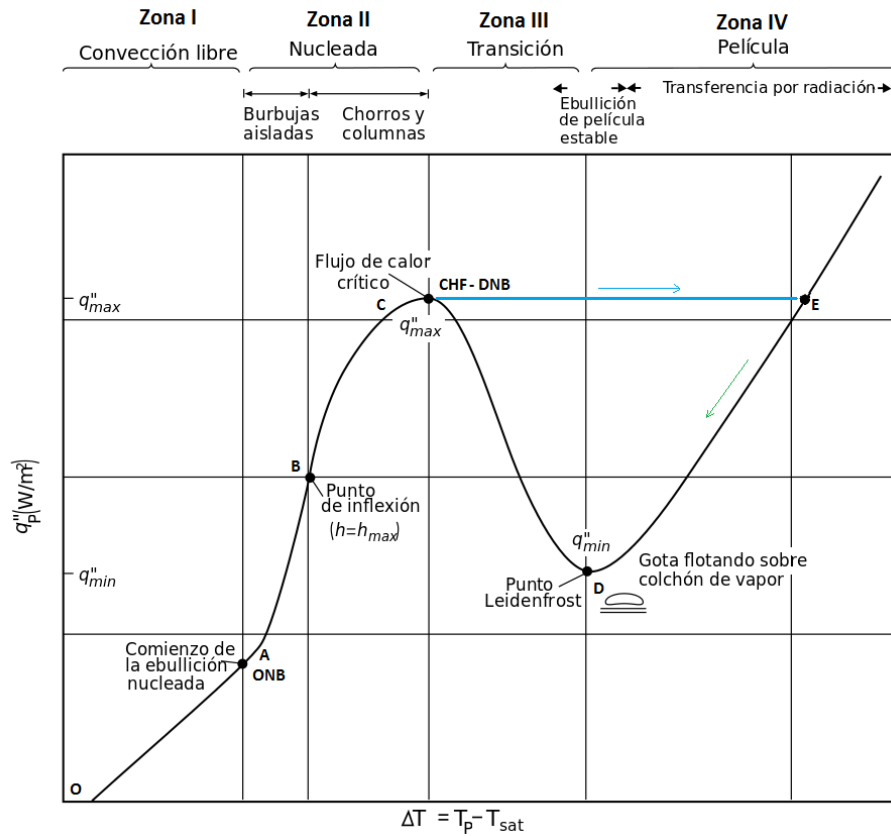


Figura 3-1.: Curva de Nukiyama para el caso de Convección natural [20]

Zona I: De convección libre (O-A)

En esta zona se está en presencia de un poco de líquido sobre calentado, la transferencia de calor se da principalmente por convección natural.

Punto A: Este punto se denomina comienzo de la ebullición nucleada o ONB (“onset nucleate boiling”) y es a partir de este punto que comienzan a aparecer las primeras burbujas.

Zona II: De ebullición nucleada (A-B-C)

Punto A-B: Representa la fase de formación de burbujas aisladas. Debido al continuo calentamiento se forman burbujas que se desprenden de la pared y tienden a ir hacia la superficie, pero colapsan luego de recorrer cierta distancia y antes de alcanzar la superficie. Como consecuencia se incrementa el coeficiente de transferencia de calor por convección debido a las burbujas.

Punto B-C: Se genera la fase de chorros y columnas (“columns and bubbles”). En esta fase, y con el incremento de la temperatura de pared se genera una gran cantidad de sitios de nucleación de burbujas. Dichas burbujas comienzan a interferir entre ellas impidiendo el movimiento del fluido, y formando columnas que llegan hasta la superficie del fluido.

Punto C: A medida que la diferencia de temperaturas aumenta, se llega al punto de flujo de calor máximo denominado CHF (“Critical Heat Flux”). En este punto, un incremento adicional de la temperatura generaría una disminución de la tasa de flujo de calor y consecuentemente un aumento brusco de la temperatura de pared. Este punto es el denominado límite de la ebullición nucleada y se lo conoce también como DNB o BO (“departure nucleate boiling” o “Burnout”).

Zona III: De ebullición en transición (C-D)

Cuando se supera la diferencia de calor del punto c se comienza a formar una película de vapor que cubre la superficie de la pared. Esta película actúa como un aislante, ya que su conductividad térmica es inferior a la del fluido.

Se caracteriza por ser una película inestable que se produce antes de la ebullición por film o película.

Luego se produce la ebullición estable por película, en torno al punto de Leidenfrost. Esta se caracteriza por presentar un colchón de vapor continuo en donde la transferencia de calor y el flujo de calor son mínimos. Las temperaturas necesarias para mantener la ebullición estable por película son elevadas, y una vez que se alcanza esta condición, una fracción significativa del calor perdido por la superficie puede dar como resultado radiación térmica.

Zona IV: De ebullición en film o película (D-E)

Dado el denso colchón de vapor generado, en esta zona la transferencia de calor se da únicamente por radiación [21].

3.5.2. Convección forzada

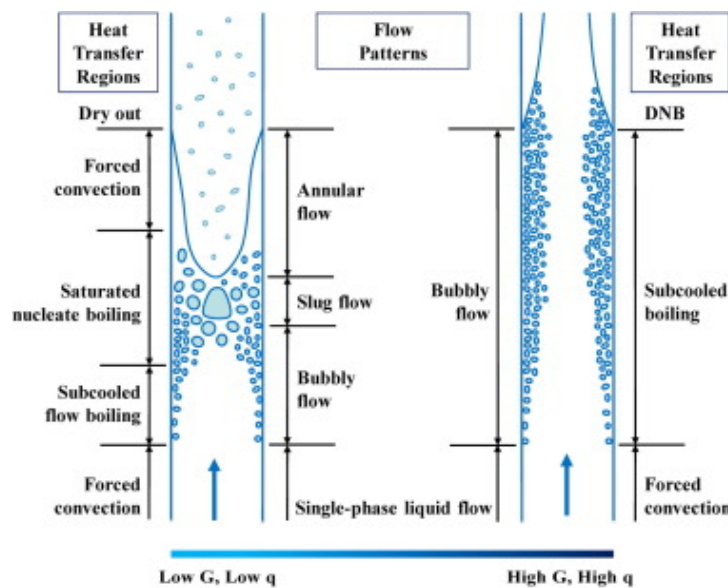


Figura 3-2.: Ebullición con convección forzada [22]

En el caso de convección forzada, tal como se vio en la clase de "Diseño de instalaciones Nucleares" se pueden distinguir tres fases principales, tal como se observa a la izquierda de la Figura 3-2:

1. Convección de simple fase
2. Ebullición sub-enfriada: En esta fase, la temperatura de la superficie de la vaina es mayor que la temperatura en el seno del fluido, y como consecuencia se da la ebullición en la cercanía de la pared.
3. Ebullición saturada o de mezcla: En esta fase, comienza la ebullición en el seno del fluido, puesto que la temperatura de la mezcla alcanza la temperatura de ebullición. Esta fase es indeseable desde el punto de vista del diseño, ya que la presencia de burbujas en el seno del fluido generan interferencia en el proceso de extracción de calor y problemas como la redistribución de caudal.

4. Capítulo 4

4.1. Análisis del estado estacionario del MI en modo rampa

4.1.1. Introducción

Como se detallo en el capítulo 2, el LOOP se encuentra compuesto por un módulo de irradiación, cuyo objetivo es el ensayo de elementos combustibles de las centrales existentes y/o centrales en desarrollo. Ello permite conocer la respuesta de los combustibles y materiales relacionados frente a distintos regímenes de potencia en el tiempo.

En particular, este capítulo hace foco en el modo rampa, el mismo consiste en un único elemento combustible nuclear tipo Atucha centrado en la posición de irradiación tal como se muestra en la Figura 4-1.

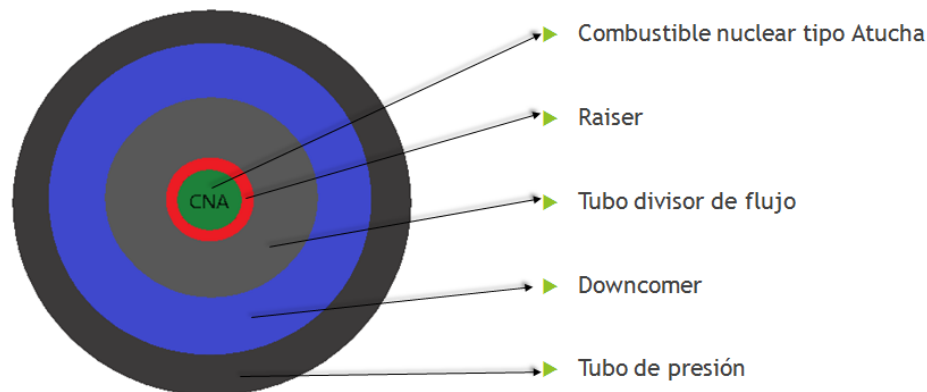


Figura 4-1.: Esquema de corte en planta del MI en modo rampa

Para el proceso de refrigeración del elemento combustible, se ingresa un fluido a 290°C de forma descendente a través del “Downcomer” el cual cambia de dirección para ingresar de forma ascendente a través del “raiser”. El fluido en este tramo se encuentra en contacto

directo con la vaina del elemento combustible, produciendo así, la refrigeración del elemento combustible mediante convección, tal como se observa en la Figura 4-2.

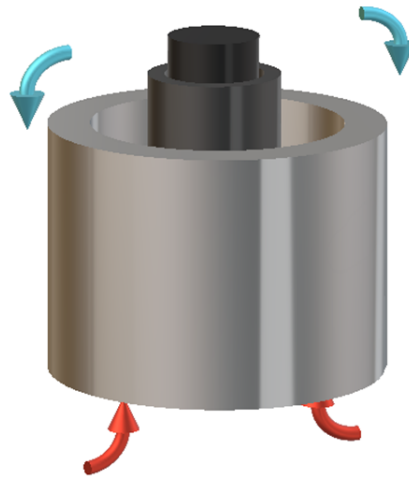


Figura 4-2.: Esquema tridimensional del EC refrigerado

4.1.2. Objetivo del capítulo

El presente capítulo procura hacer uso de los conceptos aprendidos a lo largo de la carrera y del proyecto final, a fin de implementarlos en un caso particular de análisis.

En particular, se pretende analizar uno de los modos de funcionamiento del DEEN-LOOP conocido como modo rampa. El objetivo del capítulo se centra en estudiar el estado estacionario de ese modo, haciendo uso del cálculo analítico para obtener los valores correspondientes a las variables termo hidráulicas de interés, ellas son: temperatura de salida del refrigerante, temperatura de vaina y temperatura central del combustible.

Los resultados obtenidos serán comparados con los resultados obtenidos a partir del código de cálculo RELAP a partir del informe técnico de seguridad [23].

4.1.3. Marco teórico

Para el análisis del caso planteado, se hizo uso de una serie de conceptos termo hidráulicos, los cuales serán brevemente detallados a continuación.

Conceptos de termo hidráulica aplicados

El cálculo desde el punto de vista termo hidráulico para la determinación de la temperatura de salida del refrigerante y temperatura de pared de vaina, es un cálculo iterativo.

Este se basa en el uso de ecuaciones de transferencia de calor por convección entre el refrigerante y la vaina de elemento combustible. La transferencia de calor por convección implica la transmisión de calor a través de un fluido en movimiento, con lo cual para que este fenómeno sea eficiente se requiere que el fluido en cuestión tenga una velocidad determinada, tal que se esté en presencia de un régimen turbulento.

Para determinar si un fluido en movimiento se encuentra o no bajo un régimen turbulento, se utiliza el número de Reynolds según la siguiente expresión [21]:

$$Re_{Dh} = \frac{\vec{v} D_h \rho}{\mu} \quad (4-1)$$

En donde $\vec{v}$ es la velocidad del fluido, D_h es el diámetro hidráulico de la sección que atraviesa el fluido, ρ es la densidad del fluido y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

El valor obtenido para el número de Reynolds representa el tipo de régimen en el cual se encuentra el fluido, siendo un régimen laminar para Re menores a 2000, un régimen turbulento para Re mayores a 4000 y un régimen que se denomina en transición para valores de Re entre 2000 y 4000.

Para la determinación de la temperatura de salida del refrigerante y la temperatura de pared de la vaina del EC se parte de la ecuación de enfriamiento de Newton [21]:

$$q'' = h(T_v - T_\infty) = \dot{m} c_p dT \quad (4-2)$$

En donde q'' es el flujo de calor proveniente del EC, h es el coeficiente de convección del fluido (dependiente de las características del fluido), T_v es la temperatura de pared del EC, T_∞ es la temperatura en el seno del fluido, $\dot{m}$ es el flujo másico y c_p es la capacidad calorífica específica del fluido.

En este punto es importante destacar que como T_∞ se suele utilizar la temperatura promedio o temperatura de mezcla que surge a partir de la siguiente expresión [21]:

$$T_{mezcla} = \frac{T_s - T_e}{2} \quad (4-3)$$

En donde T_s es la temperatura de salida del fluido respecto del volumen que se está analizando y T_e corresponde a la temperatura de entrada. Como se dijo inicialmente, este tipo de cálculos son iterativos, con lo cual los cálculos se repiten n veces hasta que las temperaturas converjan en un valor. Generalmente como temperatura de mezcla se suele utilizar inicialmente la temperatura de entrada del fluido para poder calcular luego la temperatura de mezcla correspondiente.

Si volvemos a la ley de enfriamiento de Newton, podemos observar que de dicha expresión y analizando el elemento de volumen correspondiente a la vaina refrigerada con el fluido, se desprende la siguiente expresión para calcular la temperatura de salida del fluido refrigerante [21]:

$$T_s = T_v - (T_v - T_e)e^{\frac{-h_p}{\dot{m}c_p}L} \quad (4-4)$$

En este punto resulta importante definir la expresión de Dittus-Boelter, puesto que para poder avanzar con el cálculo resulta necesario conocer el valor real del coeficiente de convección h . Dicha expresión se detalla a continuación [21]:

$$Nu_{DC} = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,3} \quad (4-5)$$

En donde Nu_{DC} representa el número de Nusselt que depende de coeficiente de transferencia por conducción del fluido k_f y del diámetro calefactor D_c [21]:

$$Nu_{DC} = \frac{hD_c}{k_f} \quad (4-6)$$

Y, el número de Prandtl o Pr que depende entre otras variables de la viscosidad cinemática del fluido ν de la siguiente manera [21]:

$$Pr = \frac{C_p \nu}{k_f} \quad (4-7)$$

Si a su vez, despejamos de la expresión de Dittus-Boelter el coeficiente de transferencia de calor por convección, se obtiene la siguiente expresión [21]:

$$h = \frac{k_f}{D_c} 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} \quad (4-8)$$

Implementando dicha expresión e iterando, es posible determinar la temperatura de salida del refrigerante y la temperatura de pared de la vaina del EC. Esta última variable es la que se utiliza de input en la segunda etapa de cálculo para determinar la temperatura central de la pastilla de EC [24] [25] [21] [26].

Conceptos de transferencia de calor aplicados

El cálculo desde el punto de vista de la transferencia de calor a través de distintos medios, se enfoca, en esta sección, en el cálculo aplicado al EC. El objetivo de esta sección se centra en definir las ecuaciones empleadas para el cálculo y la obtención de la temperatura en el centro de un elemento combustible a partir de la temperatura de pared de vaina obtenida según las ecuaciones del punto anterior.

Para ello comenzaremos definiendo las ecuaciones empleadas. En particular, para el cálculo de la temperatura de pared de combustible, se partió de la siguiente expresión [21]:

$$T_{paredcomb} = T_v + \frac{q'}{2\pi} \left[\frac{\ln\left(\frac{r_{gap}}{r_{comb}}\right)}{k_{gap}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{vaina}}{r_{gap}}\right)}{k_{vaina}} \right] \quad (4-9)$$

En donde, $T_{paredcomb}$ es la temperatura del combustible que se desea calcular en ($^{\circ}C$), T_v es la temperatura de pared de vaina obtenida según las expresiones del cálculo termo hidráulico en ($^{\circ}C$), q' representa la potencia lineal en (W/m), r_{vaina} representa el radio de la vaina medida desde el centro del EC en (m), r_{gap} representa el radio del gap medido desde el centro del EC en (m), r_{comb} representa el radio del pellet combustible en (m), k_{vaina} representa la constante de transferencia de calor por conducción a través de la vaina en ($W/m^{\circ}K$) y k_{gap} representa la constante de transferencia de calor por conducción a través del gap de helio en ($W/m^{\circ}K$).

Una vez obtenida la temperatura en la pared del combustible, se procede a calcular la transferencia de calor en el combustible. En este punto es importante destacar que la ecuación que se emplea es distinta, puesto que en este punto del cálculo contamos con generación de calor por parte del EC. Por lo cual, se procede a determinar la temperatura en el centro de la pastilla combustible o pellet a partir de la siguiente expresión [21]:

$$T_{comb}(r) = T_{paredcomb} + \frac{\dot{q}}{4k_{comb}}(R^2 - r^2) \quad (4-10)$$

En donde, $T_{comb}(r)$ representa la temperatura del combustible a una dada distancia del centro de la pastilla en ($^{\circ}C$), $\dot{q}$ representa en calor generado por unidad de volumen en (W/m^3), k_{comb} representa la constante de transferencia de calor por conducción a través del combustible en ($W/m^{\circ}K$), R representa el radio total de la pastilla combustible en (m) y r representa la distancia en la cual se desea calcular la temperatura medida desde el centro del combustible en (m) [24] [25] [21] [26].

4.1.4. Análisis del caso y resultados obtenidos

Para el análisis del caso propuesto, se partió del perfil de potencia lineal de la Figura 4-3 en función del informe técnico de seguridad del proyecto [27] y no se consideraron rampas de potencia en el tiempo.

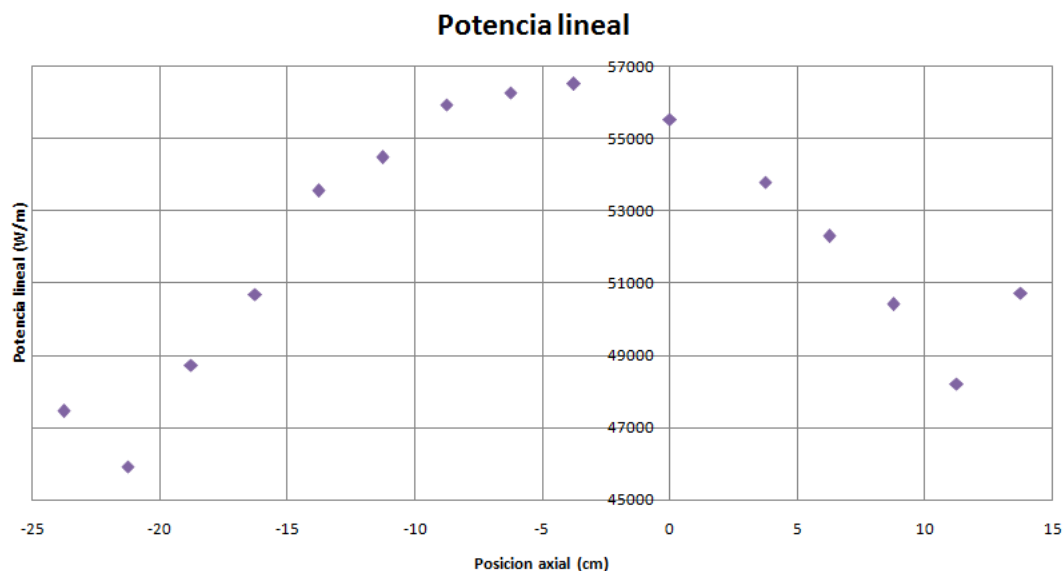


Figura 4-3.: Perfil lineal de potencias en el EC del MI según informe de seguridad [27]

A partir de dicho perfil de potencia se procedió a calcular la distribución axial de temperatura en el centro del EC.

Como datos de entrada se implementaron los siguientes valores, obtenidos a partir del informe técnico de seguridad:

Datos del canal de entrada:

Datos del canal de entrada		
Diámetro externo	0.02	m
Diámetro interno	0.01304	m
Área de paso	0.00018052	m^2
Perímetro mojado	0.1037456	m
Perímetro calefactor	0.0409456	m
Diámetro hidráulico	0.00696	m
Diámetro calefactor	0.01763485	m
Caudal de entrada	0.8	kg/s
Velocidad del fluido	6.22	m/s
Temperatura entrada	290	$^{\circ}C$

Tabla 4-1.: Datos a la entrada del canal de refrigeración

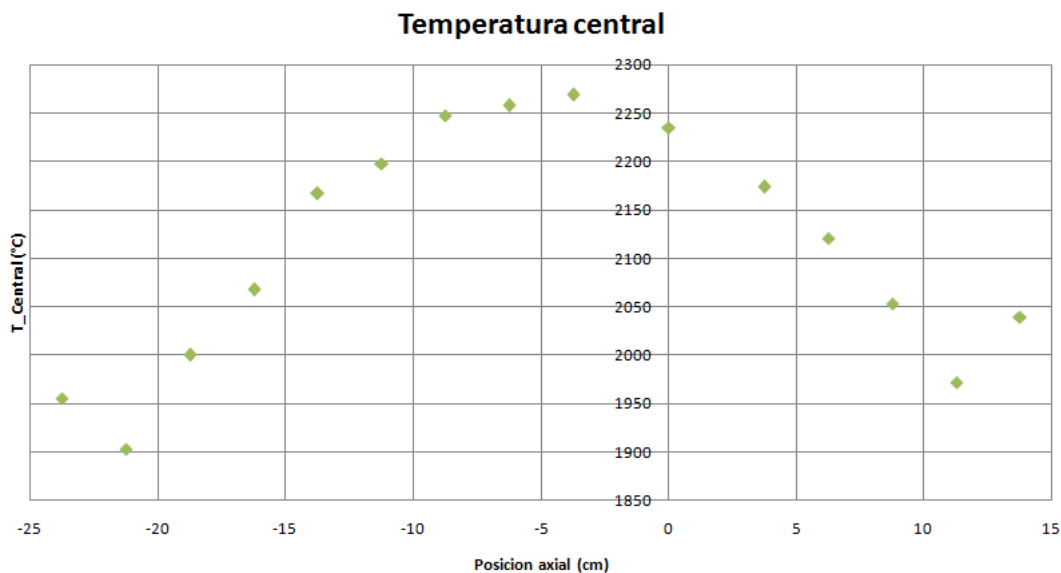
Datos de la barra combustible:

Datos de la barra combustible			
Variable	(m)	Variable	(W/m°K)
Radio del combustible	0.00595	$K_{combustible}(60^{\circ}C)$	2.5
Radio del gap	0.00598	K_{gap}	0.56
Radio de la vaina	0.00652	K_{vaina}	13.7

Tabla 4-2.: Datos de la barra combustible

La longitud activa del combustible L es de 0.4 m.

Como resultado se obtuvo la distribución de la Figura 4-4, en donde se puede observar que efectivamente la evolución de la temperatura a lo largo del EC sigue la misma evolución que la potencia.

**Figura 4-4.:** Perfil axial de temperaturas en el EC del MI en modo rampa obtenido a partir del cálculo analítico

En este punto es importante destacar que, para poder realizar el cálculo de la temperatura en el centro del EC, primero fue necesario determinar la temperatura de pared de vaina del EC, y ello implicó el uso de los conceptos de termo hidráulica anteriormente detallados.

Para el cálculo se dividió al EC en volúmenes de control, determinándose la temperatura de salida de cada volumen y la temperatura de pared de vaina correspondiente, según las constantes calculadas para cada caso.

Una vez obtenida la temperatura de pared de vaina de cada volumen de control, se procedió a realizar el cálculo de temperaturas (según la sección correspondiente a conceptos de transferencia de calor). Se obtuvo así, el perfil de temperaturas desde la pared de vaina del EC hasta el centro del elemento combustible, tal como se puede observar en la Figura 4-5 para la zona mas caliente del EC según la Figura 4-4.

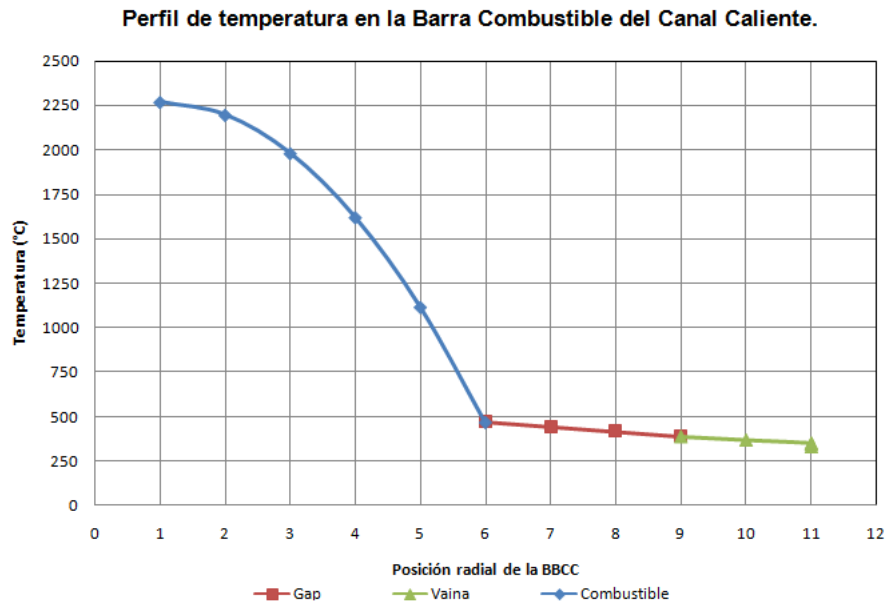


Figura 4-5.: Perfil de temperaturas radial del EC en el MI en modo rampa obtenido a partir de cálculo analítico

El resultado obtenido puede ser comparado con la Figura 4-6 que se corresponde al resultado obtenido para el modo rampa del MI según el informe técnico de seguridad a partir del uso del código de cálculo RELAP.

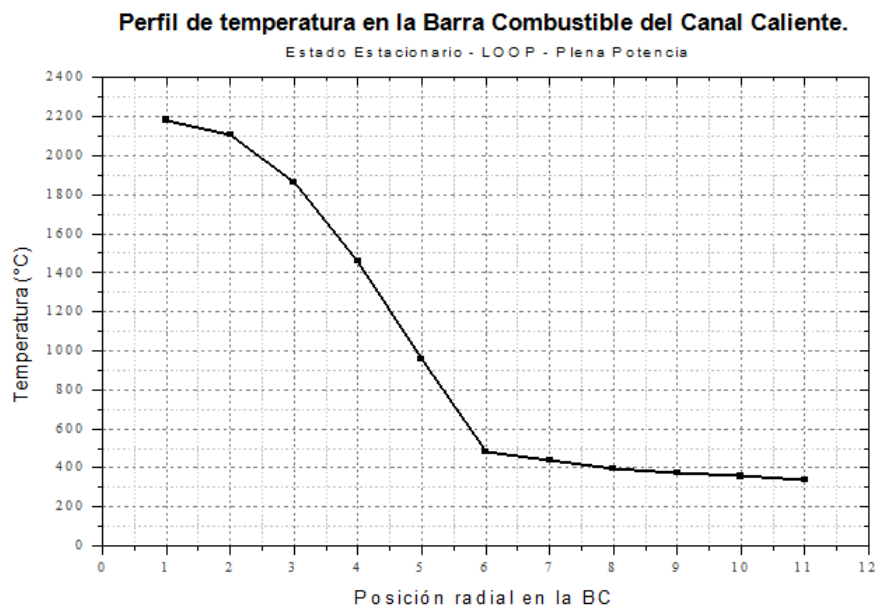


Figura 4-6.: Perfil de temperaturas radial del EC en el MI en modo rampa según informe técnico de seguridad [23]

En este caso podemos observar que la evolución obtenida a partir del cálculo analítico se corresponde efectivamente con la evolución del informe técnico.

4.1.5. Análisis y Discusiones

Si analizamos los resultados obtenidos en comparación con los resultados del código, podemos observar que la temperatura alcanzada en el centro de la barra es de 2183°C , mientras que en la pared de la vaina la temperatura es de 337°C , Figura 4-6 (datos obtenidos a partir de la IT [23]). Con el cálculo analítico, la temperatura central fue de $2268,61^{\circ}\text{C}$ y la temperatura de pared de vaina de $331,86^{\circ}\text{C}$, Figura 4-5.

Se pudo observar, en contraste con los informes técnicos, que los resultados obtenidos para el cálculo analítico y los obtenidos mediante el código son muy similares, puesto que la variación entre la temperatura central del combustible entre uno y otro es de $\pm 86^{\circ}\text{C}$, y en relación a la temperatura de pared de vaina se llegó a una diferencia de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Las variaciones observadas se deben a que durante el cálculo se asumieron ciertas variables constantes como los coeficientes de transferencia de calor dentro del elemento combustible. Por otro lado, al aplicar Dittus-Boelter para calcular el coeficiente de transferencia de calor

por convección, se realizó un cálculo iterativo hasta que la constante convergió en un dado valor; como el momento en que se deja de iterar es arbitrario, el cálculo es aproximado y guarda un cierto error, siendo éste cada vez menor a medida que el número de iteraciones aumenta. Este proceso iterativo es uno de los factores que, junto con las aproximaciones consideradas para los coeficientes de transferencia de calor y calor específico, contribuyó a la diferencia observada.

A los fines del cálculo se puede observar que, a pesar de las pequeñas variaciones que se originan como producto de las aproximaciones hechas para el cálculo analítico y las que realiza el propio software, se llega a la misma distribución de temperaturas. Para obtener resultados con una diferencia menor de la obtenida, en términos de temperatura, habría que ajustar parámetros relacionados con las constantes de los materiales y fluidos en cuestión que, a su vez, son parámetros fuertemente dependientes de la temperatura.

Por otro lado, no hay que olvidar, que el software es un código de calculo que posee sus propias aproximaciones para realizar las estimaciones necesarias a los fines de obtener sus propios resultados, con lo cual, los valores obtenidos por medio del mismo no dejan de ser valores que se aproximan a la realidad.

5. Capítulo 5

5.1. Descripción del código de cálculo

El código de planta RELAP es un código de planta diseñado para realizar evaluaciones de seguridad, siendo ampliamente utilizado a nivel internacional para el licenciamiento de instalaciones nucleares garantizando un alto grado de seguridad y estabilidad de las mismas en el tiempo. Debido a ello, el desarrollo del código fue sometido a numerosos programas internacionales de validación. Este código se puede catalogar dentro del grupo de códigos de mejor estimación.

Este código fue desarrollado en Estados Unidos por la comisión regulatoria nuclear (*Nuclear Regulatory Commission*) para el análisis de transitorios de en reactores de agua liviana.

El código se basa en el cálculo a partir del uso de modelos de dos fluidos en no equilibrio hidrodinámico. Para ello emplea una serie de modelos físicos que comprenden ecuaciones de conservación de masa, energía y momento; teniendo en cuenta transporte de momento, gradiente de presiones, fuerzas sobre volumen, fricción interfacial, etc. Así también tiene en cuenta la teoría de cinética puntual para la potencia, la teoría de conducción del calor y la difusión de boro (modelo de transporte).

En términos de la validación del código, la misma se ha realizado contrastando los resultados obtenidos contra los resultados experimentales obtenidos para los principales fenómenos que se espera que ocurran en una central nuclear refrigerada por agua. Se usaron cuatro fuentes de datos para validar el código a nivel internacional: datos de fenómenos, datos separados, datos integrales y datos de operación en planta.

En particular, para este informe, se trabajo con el código termo hidráulico de planta RELAP versión 3.2.2 beta, provisto por el Departamento de Seguridad Nuclear y Termo hidráulica del Centro Atómico Constituyentes.

5.2. Esquema de la nodalización

Este código se emplea con el objetivo de simular el comportamiento de la planta a nivel integral o de un sistema tanto en condiciones normales de operación (estacionarias) como en el caso de los transitorios.

En el caso de este informe, se tratará el caso particular de un transitorio, y se analizará su evolución a partir de los datos obtenidos por medio del uso de éste código.

Particularmente el uso del código requiere la compartimentación de la planta en volúmenes de control (con determinadas propiedades de geometría, orientación, etc), este proceso de compartimentación se denomina nodalización, y cada volumen representa distintos componentes del reactor que están vinculados termo hidráulicamente por uniones y térmicamente por estructuras. Esto se puede observar en las Figuras **5-1** y **5-2** de la Sección 5.2, que representan la nodalización del dispositivo LOOP que es objeto de estudio de éste informe.

Para la comprensión del esquema de nodalización utilizado y las modificaciones propuestas en los análisis del capítulo siguiente, se hizo uso del Anexo A.

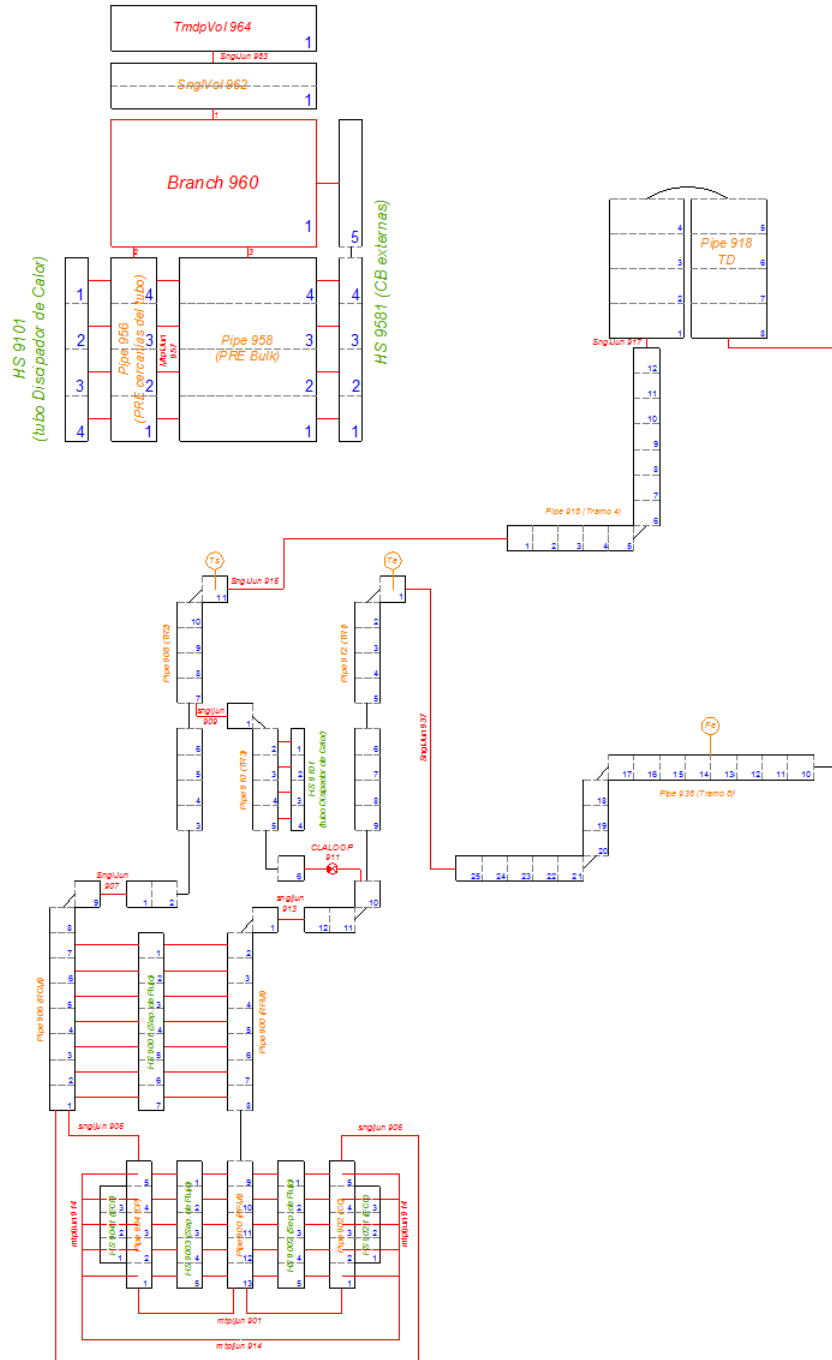


Figura 5-1.: Esquema de la nodalización Parte A [15]

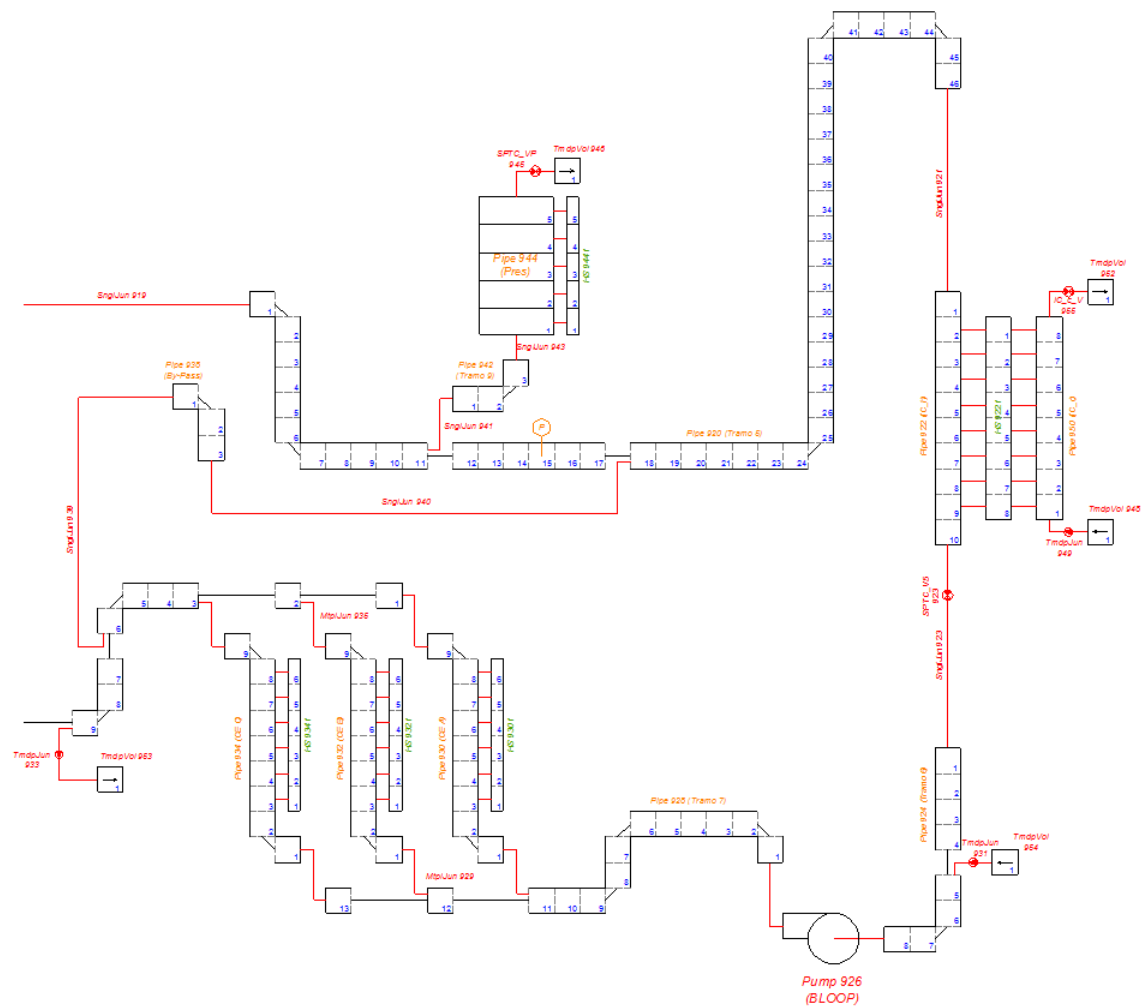


Figura 5-2.: Esquema de la nodalización Parte B [15]

6. Capítulo 6

6.1. Análisis de un evento iniciante en el DEEN-LOOP y el impacto de distintos volantes de inercia en la evolución del mismo

Este capítulo tiene por objetivo analizar un dado evento iniciante a modo de simulación en el LOOP del reactor RA-10, en el modo base del sistema. En particular se va a analizar el caso de un LOFA (“Loss of flow accident”) con falla de la clapeta del SPARPL.

El LOFA constituye un caso de estudio muy importante desde el punto de vista de la seguridad de una planta o sistema, puesto que la falta de refrigeración de un EC conlleva a un aumento en la temperatura de la pared de la vaina. Si la temperatura de la pared supera ampliamente la temperatura de saturación del fluido refrigerante, se produce la ebullición y se altera, como se explicó anteriormente, el proceso de refrigeración y extracción de calor.

Consecuentemente, el combustible alojado en el interior del EC aumentará su temperatura y se producirán cambios que pueden alterar la estabilidad mecánica del elemento (pudiéndose producir cambios de fase o la fusión del combustible, si el mismo es metálico; o crackig y sweeling si el mismo es cerámico).

Es por ello que el proceso por el cual se llevará a cabo la de extracción de calor debe ser diseñado respetando ciertos márgenes de seguridad para evitar que el proceso de transferencia de calor hacia el refrigerante se vuelva inestable y se genere un film de vapor en la superficie de la vaina.

El criterio de diseño que se utiliza para tener en cuenta estos fenómenos es el DNBr o CHF_r. Este factor permite dar una idea de que tan alejado está el flujo de calor respecto del valor en el cual se produce el alejamiento de la ebullición nucleada conocido como CHF (flujo crítico de calor o critical heat flux). Este factor será objeto de estudio en este capítulo, realizando un análisis respecto de su importancia y significado.

El objetivo principal de este informe es realizar un análisis de sensibilidad del LOOP para distintos volantes de inercia. Para ello, se analizará la evolución del sistema según distintos volantes de inercia para el mismo evento; y luego se realizará un análisis de la evolución del flujo de calor haciendo referencia al CHF_r o *ratio* y la evolución del CHF del sistema en el tiempo con su correspondiente análisis.

6.1.1. Análisis de la sensibilidad del sistema de refrigeración en un caso accidental para distintos volantes de inercia

En esta sección se pretende, mediante la simulación del evento planteado en el LOOP, analizar la evolución del sistema en relación a distintos volantes de inercia. Para ello se simulará el mismo evento mediante el código RALAP, variando el momento de inercia del componente PUMP 926 del sistema.

Para ello se hizo uso de un archivo input provisto por el director de este proyecto integrador. El mismo se usó como punto de partida en los análisis de los distintos casos que se analizaron a lo largo de este informe.

En esta instancia, se pretenden analizar seis casos distintos, a modo de comparación, con el objetivo de estudiar la sensibilidad del sistema de refrigeración. Para ello se evaluarán las presiones y temperaturas correspondientes a la zona más caliente del elemento combustible, en el canal caliente (componente PIPE 902-03 CC). Puesto para el análisis de seguridad, esta zona representa una zona importante en términos de la refrigeración debido a que es la que alcanzará la mayor temperatura.

Caso a analizar

Como se adelantó en la sección anterior, se analizarán seis casos distintos en donde el evento que se desarrolla es el mismo.

Los casos a analizar, implican variaciones en el momento de inercia del componente PUMP-926, siendo los mismos detallados a continuación:

- **Caso 1:** Comp. Pump-926 con momento de inercia de 0,2 kg/m².

- **Caso 2:** Comp. Pump-926 con momento de inercia de 1 kg/m².
- **Caso 3:** Comp. Pump-926 con momento de inercia de 2 kg/m².
- **Caso 4:** Comp. Pump-926 con momento de inercia de 10 kg/m².
- **Caso 5:** Comp. Pump-926 con momento de inercia de 20 kg/m².
- **Caso 6:** Comp. Pump-926 con momento de inercia de 40 kg/m².

Cabe mencionar que el intervalo de tiempo que utiliza el código es de 5 segundos. Este intervalo se mantuvo constante para cada simulación y no fue modificado. Su importancia y el grado de confiabilidad en los resultados será discutida a lo largo de este capítulo.

Hipótesis planteadas

1. En términos del Volante de inercia y el caudal de refrigeración

Con respecto al volante de inercia, se espera ver que a medida que el momento de inercia aumente, la bomba tarde más para detenerse, es decir que el coastdown de la bomba aumente.

A su vez, se espera que, por el contrario, el tiempo hasta llegar a cero (coastdown) se acorte cuando se baja el volante de inercia, debido a que, al cortar el suministro de energía, frena su funcionamiento más rápido, es decir menor inercia frente al cambio de estado.

2. En términos de la evolución esperada para la temperatura en el combustible

Debido a la pérdida de caudal, la velocidad del fluido decrece en el tiempo. Este hecho tiene un impacto negativo sobre el coeficiente de transferencia de calor, puesto que afecta el régimen de turbulencia del fluido al disminuir el número de Reynolds. Como consecuencia la eficiencia en la extracción del calor se verá afectada.

Este hecho se debería ver reflejado, en la evolución de la temperatura del refrigerante, en donde se espera ver, una caída en los valores de esta variable.

3. En términos de la evolución esperada para la presión en el combustible

Se espera observar que como la bomba se detiene debido a la falta de suministro eléctrico, la presión en el fluido debería caer, puesto que la fuerza impulsora de la bomba ya no está.

Luego de un tiempo, y debido al aumento de temperatura que se produce, la presión en el refrigerante, debería volver a subir, debido a los cambios de densidad en el fluido como consecuencia de la ebullición que se comienza a generar.

Resultados de la simulación y conclusiones

1. En términos del Volante de inercia y el caudal de refrigeración

Esta hipótesis se comprobó mediante la Figura 6-1 . Como se puede observar, el evento comienza a los 200 segundos, esto se ve reflejado en el hecho de que, para los seis casos, la caída en el caudal se da en el mismo instante de tiempo, como consecuencia de la pérdida de suministro eléctrico.

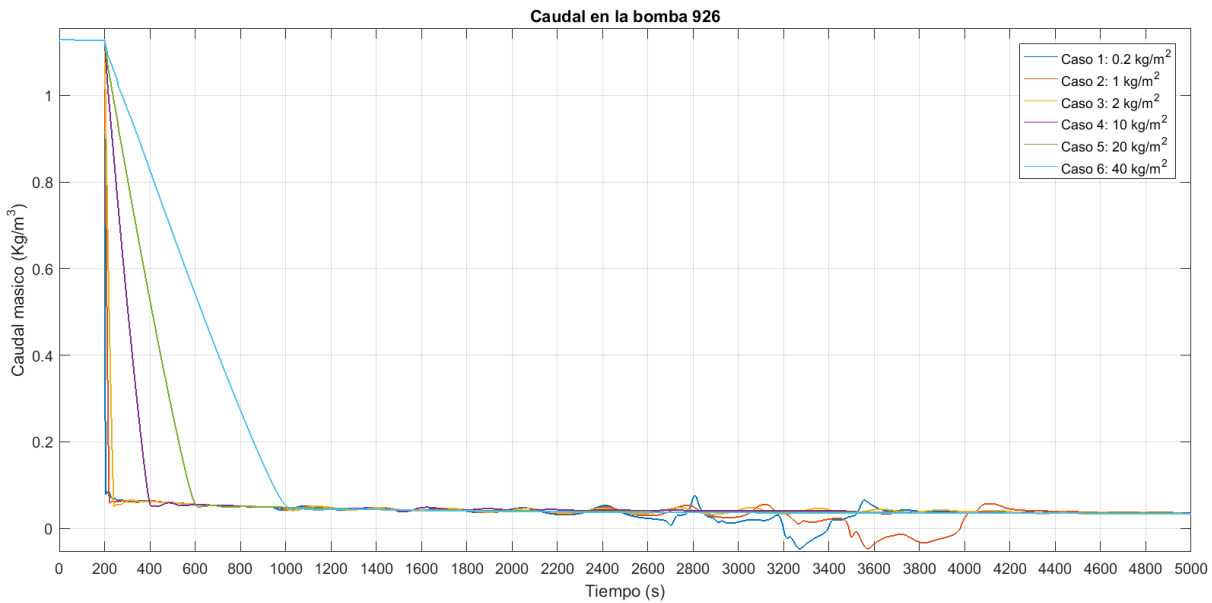


Figura 6-1.: Comparación de la evolución del caudal para distintos volantes de inercia

Como se puede observar, la primer hipótesis planteada efectivamente se cumple. Es decir, a medida que aumentamos el momento de inercia de la bomba el coastdown también aumenta, y la bomba tarda más tiempo hasta detenerse por completo.

Sin embargo, se pueden observar ciertas singularidades en la simulación, en torno a las corridas que se corresponden con los casos de menor momento de inercia, es decir, caso 1

y caso 2, tal como se observa en la Figura 6-2 .

Se puede observar que, para ambos casos, el caudal, una vez que la bomba se detuvo por completo, adquiere valores negativos. Este hecho, se puede deber a las aproximaciones que realiza el código para resolver los valores que se encuentran en un dado intervalo de tiempo. En ambos casos se trata de inercias muy chicas y el código encuentra dificultades para resolver esos intervalos, es probable que, para una mejor resolución, se vuelva necesario el hecho de modificar el intervalo de tiempo usado para el cálculo.

Este mismo hecho no se da cuando se utiliza momentos de inercia más altos, puesto que los intervalos de tiempo utilizados para resolver el problema son adecuados para esos casos.

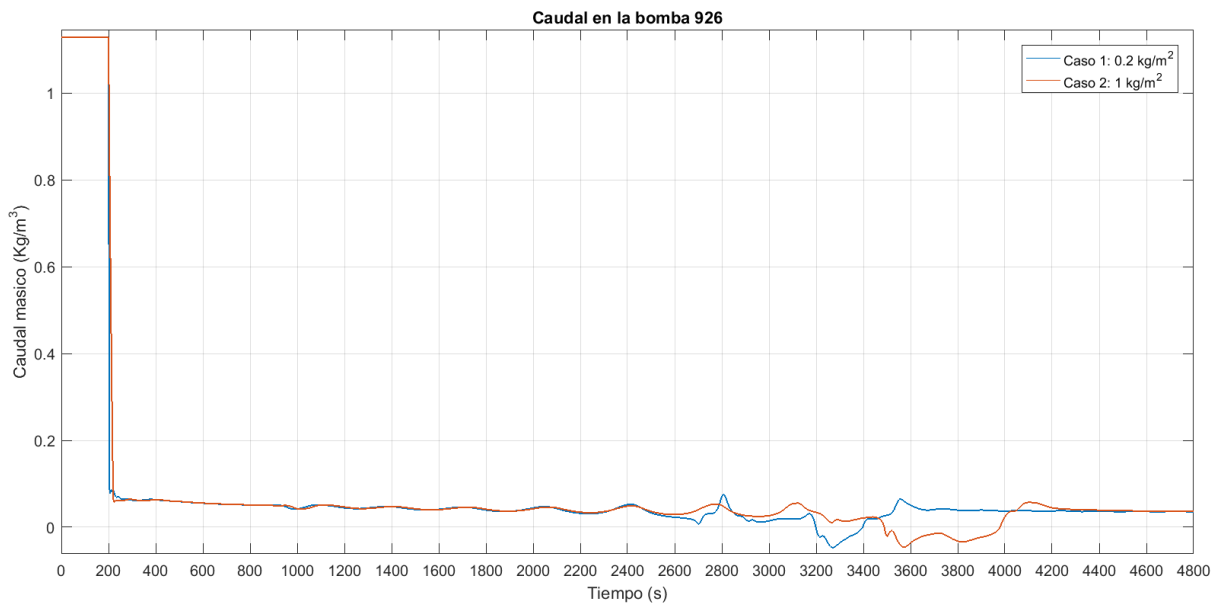


Figura 6-2.: Comparación de la evolución del caudal para el caso 1 y el caso 2

Como se dijo a principio del capítulo, no se modificó el intervalo de tiempo en ninguna de las corridas realizadas y se mantuvo siempre constante. Es gracias a ello que se pudo observar este hecho o singularidad del código.

Análisis de falla de la clapeta

Por otro lado, tal como se observa en la Figura 6-3, se puede ver que la curva en el tiempo del caudal del refrigerante tiene la misma forma que la curva del caudal de la bomba.

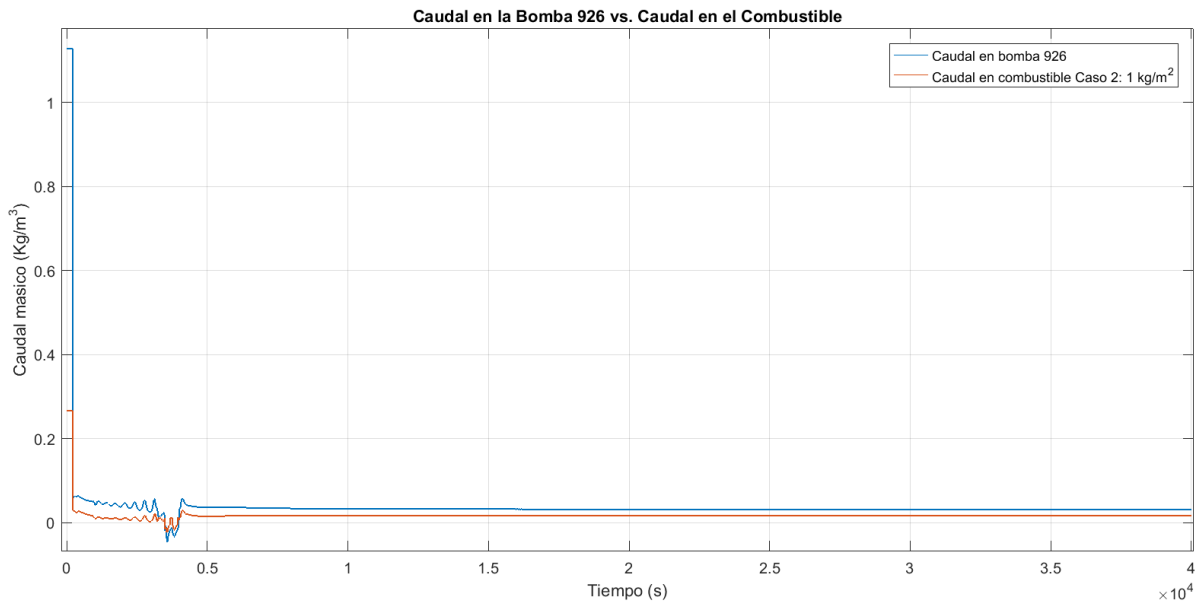


Figura 6-3.: Comparación de la evolución del caudal en la bomba y en el combustible

Esto se debe a que el caudal en la zona del MI sigue la misma evolución que el caudal en la zona del SPTC en donde se encuentra la bomba y, por lo tanto, se puede concluir que no se activó ningún otro sistema que permita que se re inserte caudal en la zona del MI. Es decir, esta evolución que se observa en la gráfica, se puede traducir como una falla en la válvula clapeta.

2. En términos de la evolución esperada para la temperatura en el combustible

Si se analiza la evolución de la temperatura en el refrigerante a mitad de altura del EC en el canal caliente, se puede observar en la Figura 6-4, que la evolución es acorde a lo esperado, puesto que la extracción de calor por parte del refrigerante es menor debido a que el caudal disminuye, baja la velocidad del fluido y disminuye el Reynolds.

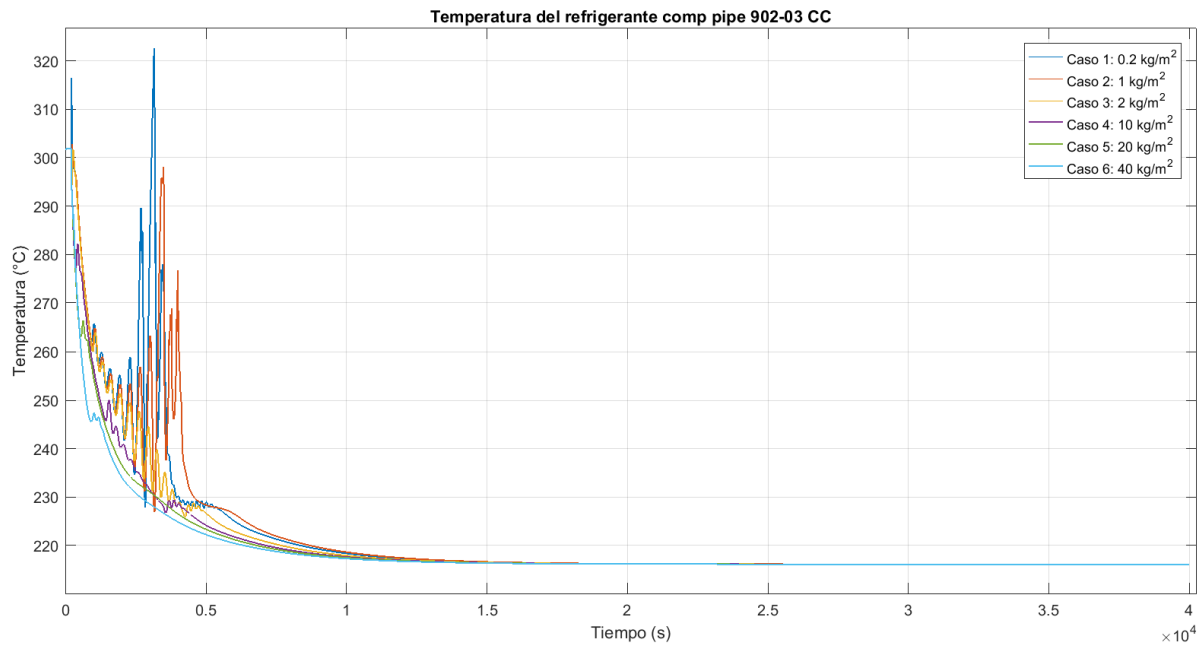


Figura 6-4.: Comparación de la evolución de la temperatura del refrigerante en el MI para distintos volantes de inercia

Podemos observar que a medida que la inercia de la bomba es mayor, la temperatura cae de forma más brusca. Sin embargo, como se puede ver en el gráfico, las curvas siguen la misma evolución y el alejamiento entre una y otra es mínimo.

Por otro lado, si analizamos las curvas de menor inercia, por ejemplo, la curva del caso 2, tal como vemos en la Figura 6-5 , podemos observar que presenta una gran cantidad de oscilaciones que no debería tener.

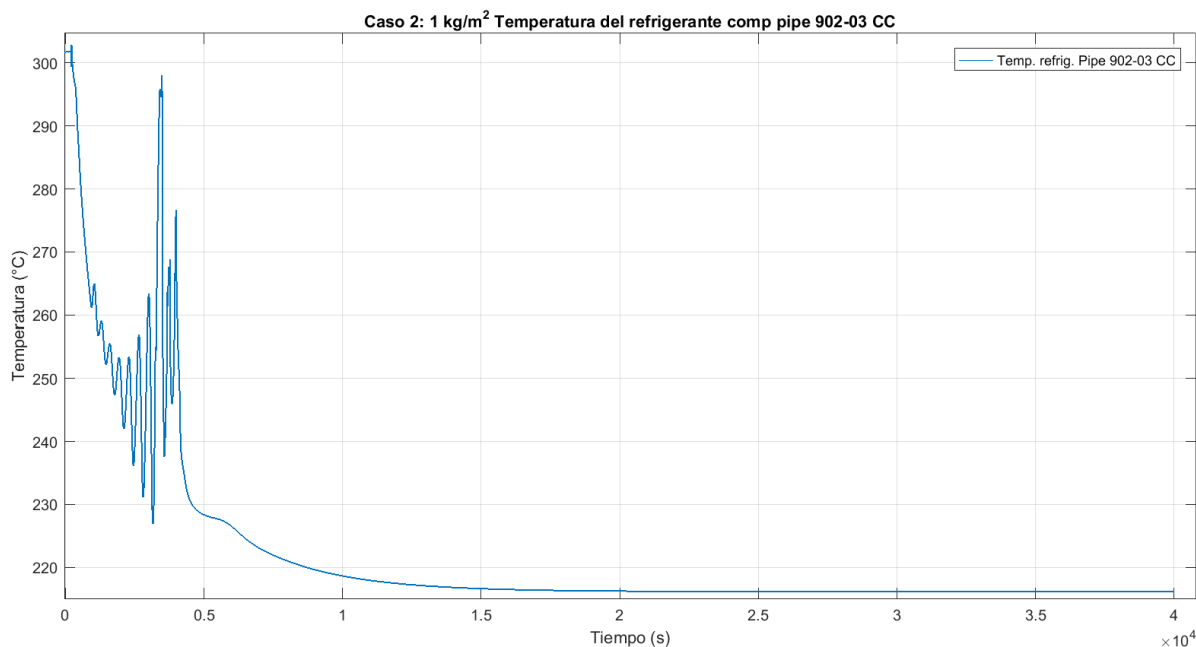


Figura 6-5.: Evolución de la temperatura del refrigerante en el MI para el caso 2

Este mismo hecho sucede con el caso del caudal, dichas fluctuaciones disminuyen a medida que se aumenta la inercia de la bomba, probablemente porque el código resuelve mejor los espacios intermedios entre dos espacios de tiempo cuando se trata de inercias muy grandes.

Esto último se puede observar en la Figura 6-6, en donde para inercias mayores la cantidad de fluctuaciones disminuye notablemente. Para estos dos últimos casos, observamos que la evolución tiende a ser como lo esperado.

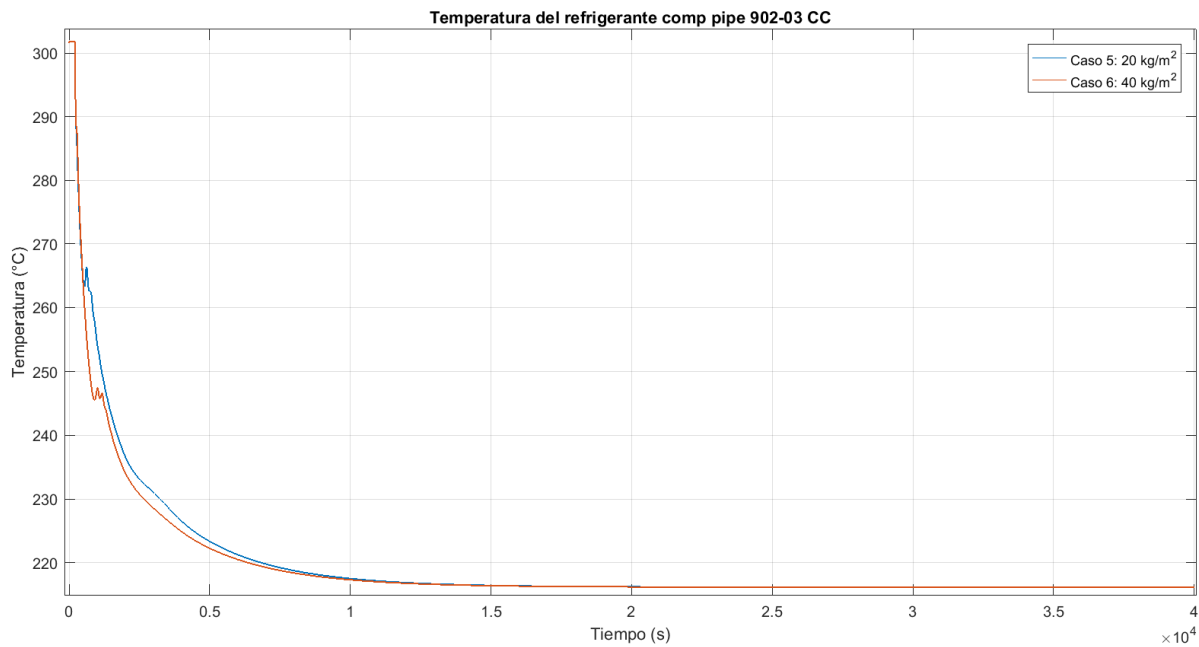


Figura 6-6.: Evolución de la temperatura del refrigerante en el MI para el caso 5 y el caso 6

Esta caída en la temperatura del refrigerante se puede traducir como una caída en los ritmos de extracción de calor, causada por la caída del caudal.

3. En términos de la evolución esperada para la presión en el combustible

Por último, se analizó la presión del refrigerante a mitad de altura del EC en el canal caliente. Si observamos la Figura 6-7.

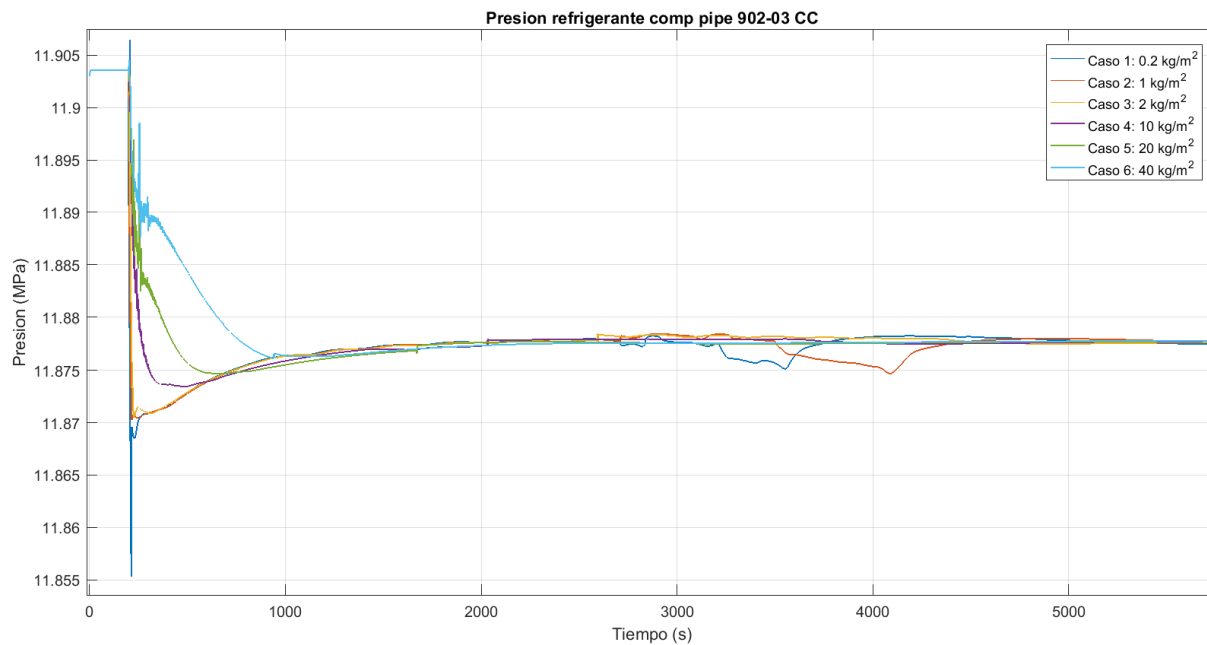


Figura 6-7.: Comparación de la evolución de la presión del refrigerante en el MI para distintos volantes de inercia

Se puede ver que la presión en el refrigerante cae cuando ocurre el evento, como consecuencia de la falta de energía de alimentación de la bomba, puesto que la fuerza impulsora desaparece.

Luego de un tiempo, podemos observar que la presión vuelve a subir y se estabiliza en una presión más baja, tal como se esperaba. Esta subida en la presión se produce debido al aumento de temperatura en la pared del combustible. La densidad en el fluido se ve afectada por los cambios de temperatura, dichos cambios afectan directamente la presión del fluido, y podrían generar fenómenos de ebullición que producirían un aumento en la presión del refrigerante.

Si observamos la Figura 6-8, en donde se comparan dos casos de inercias distintas, podemos ver que la caída de presión es brusca para inercias bajas y más suaves para inercias altas. Luego, dicha presión, comienza a subir de forma más suave hasta que se estabiliza.

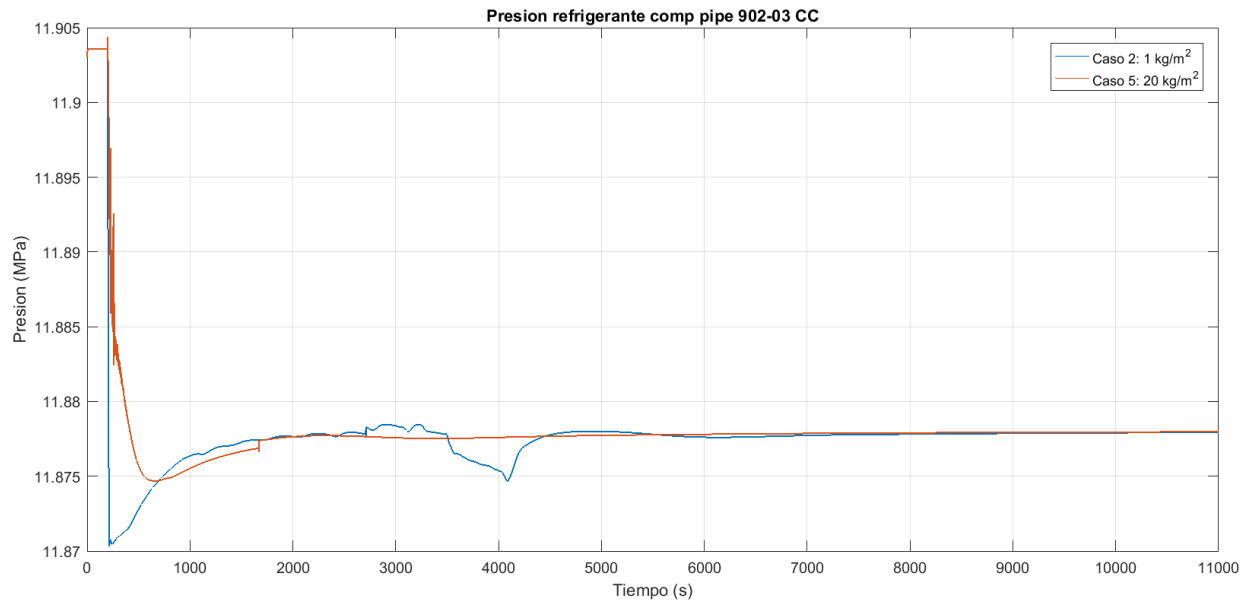


Figura 6-8.: Evolución de la presión del refrigerante en el MI para el caso 2 y el caso 5

En la Figura 6-7 se puede observar un segundo pico o depresión para los dos casos de inercias bajas, es decir, caso 1 y caso 2. Si comparamos el caso 2 con un caso de mayor inercia como el caso 5, Figura 6-8, podemos ver que para el caso 5 el segundo pico no existe, con lo cual se llega a la misma conclusión que para la temperatura y el caudal, es decir, que el segundo pico se puede deber a un problema del código para resolver ese intervalo de tiempo.

Es importante mencionar que no se descarta el hecho, de que al tratarse de intervalos de tiempo muy chicos, puedan existir otros fenómenos termo hidráulicos. Sin embargo, las variaciones observadas en los parámetros de control como presión y temperatura son muy chicas, con lo cual no representarían un problema en términos de seguridad.

6.1.2. Análisis de la evolución del flujo de calor

Fundamento teórico aplicado

Para el cálculo analítico del QCHF se aplicó la correlación westinghouse-3 o W-3, la cual es ampliamente utilizada para condiciones PWR, donde DNB es el mecanismo dominante de CHF.

Para el cálculo se emplea la ecuación que se detalla a continuación [28]:

$$q'' = q''_{CHF}(p, x_e, G, D_c, h_f, h_{in}) = k_1(p, x_e) \times k_2(x_e, G) \times k_3(x_e, D_c) \times k_4(h_f, h_{in}) \quad (6-1)$$

$$\begin{aligned} k_1 &= \{(2,022 - 0,06238p) + (0,1722 - 0,01427p)e^{(18,177-0,5987p)x_e}\} \\ k_2 &= [(0,1458 - 1,596x_e + 0,1729x_e |x_e|)2,326G + 3271] \\ k_3 &= [1,157 - 0,869x_e][0,2664 + 0,8357e^{(-124,1D_c)}] \\ k_4 &= [0,8258 + 0,0003413(h_f - h_{in})] \end{aligned}$$

En donde:

- q''_{CHF} representa el flujo critico de calor (kW/m²)
- p representa la presión (MPa) válido entre [5,5 y 16 MPa]
- x_e representa el título de vapor válido entre [-0,15 y 0,15]
- D_c representa el diámetro calefactor (m) válido entre [0,015 y 0,018 m]
- G representa el flujo másico (kg/m²s) válido entre [1,356 y 6,800 kg/m²s]
- h_{in} representa la entalpía de entrada (kJ/kg) válido entre [930 kJ/kg]
- h_f representa la entalpía de líquido saturado (kJ/kg)
- L representa longitud del tubo (m) válido entre [0,254 y 3,70 m]

Cálculo analítico

El cálculo de flujo crítico de calor se realizó sobre el componente 902-03 del CC del MI, puesto que representa la zona más caliente a mitad de altura del EC en el canal caliente.

Se emplearon los datos de la Tabla **6-1**, extraídos a partir de los cálculos realizados con el código para cada caso en particular:

Variable	Código	Detalles
Presión P	p	Datos en MPa
Título de equilibrio x_e	$quale$	
Flujo másico G	$mflow$	Se dividió por el área de paso para obtener las unidades correspondientes en $\frac{kg}{m^2s}$
H_{in}		El detalle de cálculo se encuentra en la sección correspondiente.
H_f		El detalle de cálculo se encuentra en la sección correspondiente.
Velocidad del fluido v_f	$velf$	Es la velocidad del fluido en cada instante de tiempo $\frac{m}{s}$
Densidad del fluido ρ	$rhof$	Es la densidad del fluido en cada instante de tiempo $\frac{kg}{m^3}$
Flujo de calor q''	$htrnr$	En cada instante de tiempo, calculado por RELAP en $\frac{W}{m^2}$
Flujo crítico de calor q''_{CHF}	$htchf$	En cada instante de tiempo, calculado por RELAP en $\frac{W}{m^2}$

Tabla 6-1.: Variables empleadas en los cálculos

Datos del proyecto:

- Área de paso: 0.00018052 m^2
- Diámetro calefactor: 0.01763485 m
- Longitud activa del combustible L : 0.4 m

Aproximaciones usadas para el cálculo

Para el cálculo de k_4 , se requiere del cálculo de las entalpías en cuestión. Para ello, se aplicó la siguiente expresión:

$$\Delta H = \Delta U - P\Delta V = (h_{in} - h_f) \quad (6-2)$$

En donde ΔU es la variación de energía interna y se puede expresar como: $\Delta U = (U_{out} - U_{in})$.

Datos usados a partir del código y procedimientos de cálculo

- U_{out} : Se consideró la energía interna específica del fluido y del gas para el componente 902-04 (u_f y u_g respectivamente en el código en J/kg) y se aplicó la siguiente expresión, usando el título como dato:

$$U_{out} = x_e \times U_g + (1 - x_e) \times U_f \quad (6-3)$$

- El mismo procedimiento se realizó con U_{in} para el componente 902-02.
- Se uso la presión p del componente 902-03.
- Para el cálculo de ΔV se aplicó la siguiente expresión:

$$\Delta V = (V_{out} - V_{in}) \quad (6-4)$$

- Obteniendo V_{out} de la siguiente manera a partir del componente 902-04:

$$V_{out} = \frac{1}{3} \times \frac{\dot{m}L}{\vec{v}_f \rho} \quad (6-5)$$

- Se aplicó la misma expresión para el V_{in} pero a partir del componente 902-02.
 - El factor $\frac{1}{3}L$ representa la longitud del volumen que se esta analizando.
 - $\vec{v}_f$ es la velocidad del fluido en cada instante de tiempo
 - ρ representa la densidad del fluido en cada instante de tiempo
 - m es el flujo másico del fluido en kg/s

NOTA: Las ecuaciones y conceptos implementados en ésta sección son conceptos adquiridos a lo largo de la cátedra de Termodinámica del instituto de tecnologia nuclear Dan Beninson.

Resultados obtenidos y conclusiones

Análisis de los flujos de calor

El cálculo se realizó para el caso 2 con un volante de inercia de 1kg/m^2 , con el objetivo de comparar el resultado obtenido en relación al resultado que arroja el código. Utilizando las expresiones detalladas anteriormente y aplicando la Ecuación 6-1, se obtuvieron los resultados observados en la Figura 6-9 para el flujo critico de calor, en relación al flujo de calor Q'' y al flujo critico de calor Q''_{CHF} obtenidos por RELAP.

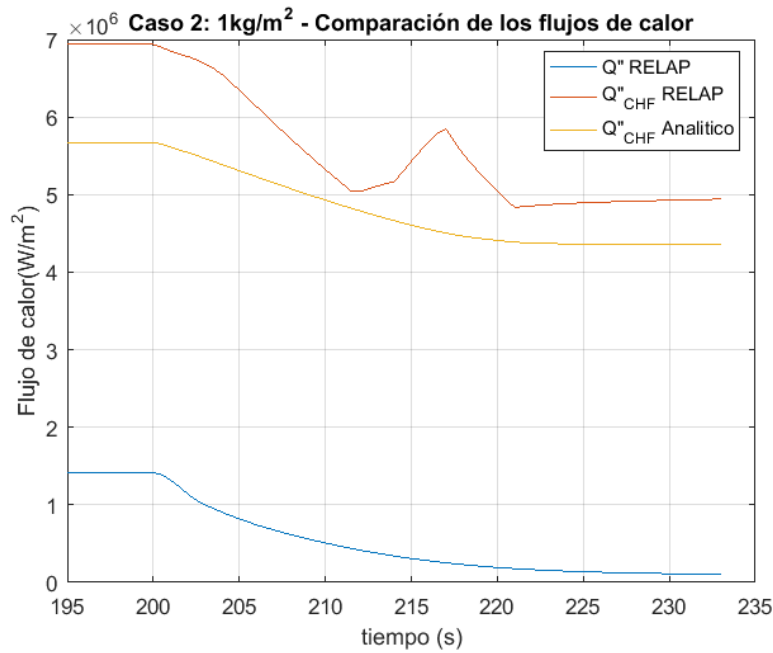


Figura 6-9.: Comparación de los flujos de calor

Cabe mencionar que el análisis realizado para el caso 2 se realizó en el intervalo de tiempo que se observa en la figura, puesto que los valores que seguían para Q''_{CHF} en RELAP eran igual a cero. A su vez, se puede observar que los valores de flujo de calor comienzan a caer a los 200 segundos, es decir cuando comienza el evento.

Si bien, en el gráfico se puede observar que ambos casos de Q''_{CHF} siguen una evolución similar, resulta difícil poder realizar un análisis comparativo de forma directa, con lo cual, para realizar el análisis correspondiente, se determinará el ratio o CHF_{ratio} para ambos casos

a fin de realizar dicho análisis.

Análisis en función del CHF_{ratio}

Como se explicó anteriormente, resulta necesario obtener una medida que permita comparar la evolución de la curva obtenida por RELAP y la obtenida de forma analítica. Es por ello que se utiliza el ratio para la comparación de estas dos medidas según la siguiente expresión:

$$CHF_{ratio} = \frac{Q''_{CHF}}{Q''} \quad (6-6)$$

Donde Q''_{CHF} se corresponde a los valores obtenidos en el código y los cálculos analíticos, según cada caso, y Q'' representa el flujo de calor obtenido por el código para el componente 902-03 en (W/m²).

Los resultados obtenidos, se pueden observar en la Figura 6-10, y se corresponden al intervalo de tiempo analizado.

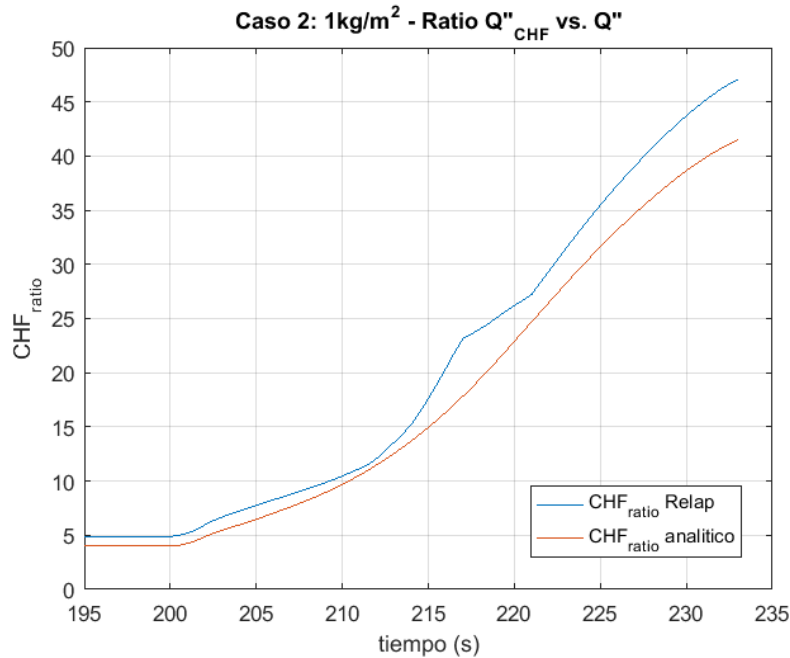


Figura 6-10.: Comparación de los CHF_{ratio} en función del tiempo

Análisis del flujo de calor en relación a las variaciones de temperatura en el refrigerante

Se graficó el $CHF_r = \frac{Q''_{CHF}}{Q''}$ en función de un delta de temperaturas entre $T_{pared} - T_{sat}$ del fluido. Cabe mencionar, que la idea de realizar este análisis surgió a partir de la curva de Nukiyama.

El resultado que se obtuvo se puede observar en la Figura 6-11.

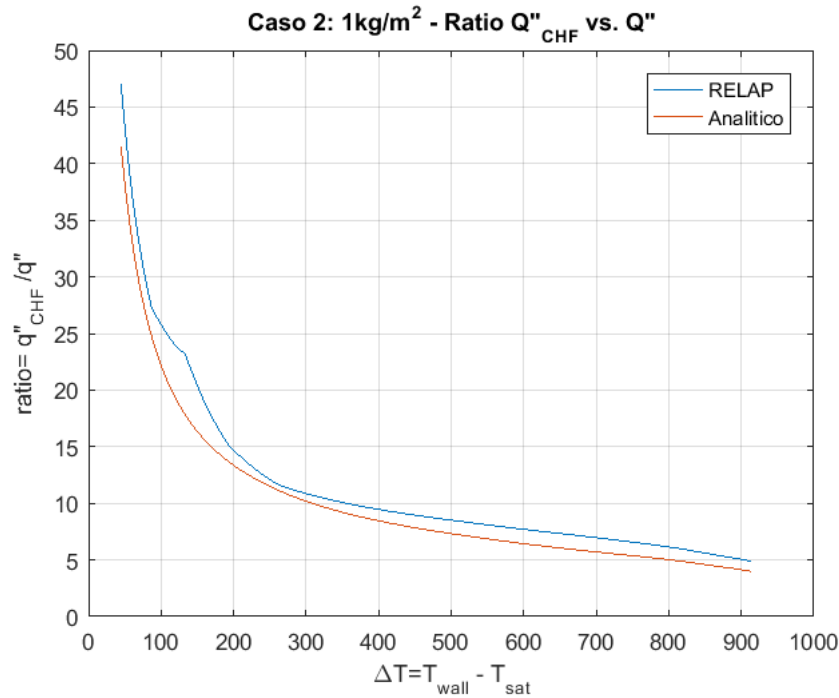


Figura 6-11.: Comparación de los CHF_{ratio} en función del ΔT

Como se observa el valor de CHF_r disminuye a medida que la temperatura en la pared aumenta, desde el punto de vista analítico, dicha evolución es lógica, puesto que el Q'' de la pared hacia el refrigerante aumenta como consecuencia de la dificultad de extraer calor (por lo expresado anteriormente).

Lo que se observa es que Q'' de la pared tiende a Q''_{CHF} como consecuencia de un aumento de temperatura generado a causa de la pérdida de refrigeración en el combustible.

Si bien, los valores de CHF_r son valores relativos que no se puedan relacionar o comparar directamente con un valor real de un informe de seguridad, la evolución que se puede observar es acorde a lo esperado en función de la evolución del sistema.

Nota: En el caso 2, el evento dura alrededor de unos 30 segundos, luego el sistema comienza a tomar valores estacionales en función de la evolución que sufrió previamente.

6.1.3. Análisis del evento en el combustible en términos del flujo de calor y su variación para distintos volantes de inercia

Si nos enfocamos en los flujos de calor en términos del CHF_{ratio} para distintos volantes de inercia, tal como podemos observar en la Figura 6-12, podemos observar que el CHF_{ratio} tiende a adquirir valores mas chicos en el tiempo para volantes de inercia mayores, mientras que sucede lo contrario para inercias mayores.

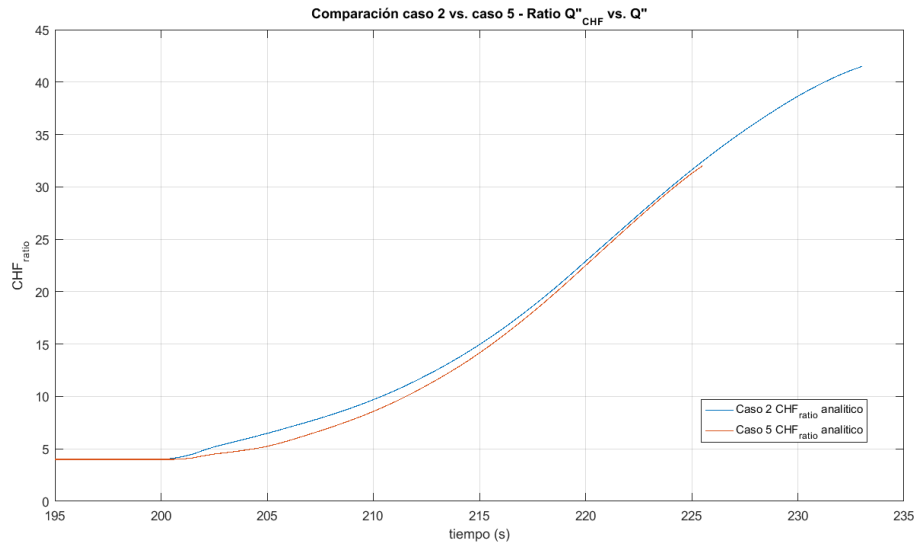


Figura 6-12.: Comparación de los CHF_{ratio} caso 2 y caso 5 en función del tiempo

Sin embargo, podemos observar que estas variaciones del CHF_{ratio} entre un caso y el otro son mínimas. Si nos basamos en el hecho de que el CHF_{ratio} representa que tan alejado se encuentra el flujo de calor respecto del flujo crítico de calor en el cual se da produce el DNB o burn-out, podemos concluir que en este sentido, la elección de un volante de inercia u

otro, no representa un cambio sustancial en el ratio, puesto que si bien, es lógico que ambas funciones aumenten en el tiempo debido al evento que se desarrolla en la simulación, las dos evoluciones tienden a ser muy similares.

Si realizamos el mismo análisis, pero esta vez en términos de la diferencia de temperatura entre la pared del combustible y la temperatura de saturación del fluido refrigerante, obtenemos la evolución de la Figura 6-13. Tal como observamos en esta figura, la evolución del CHF_{ratio} va decreciendo a medida que la diferencia de temperaturas aumenta. Esto se debe, a que el flujo de calor en la pared es mayor a medida que temperatura de la pared aumenta, puesto que el ritmo de extracción del calor disminuye como consecuencia del LOFA.

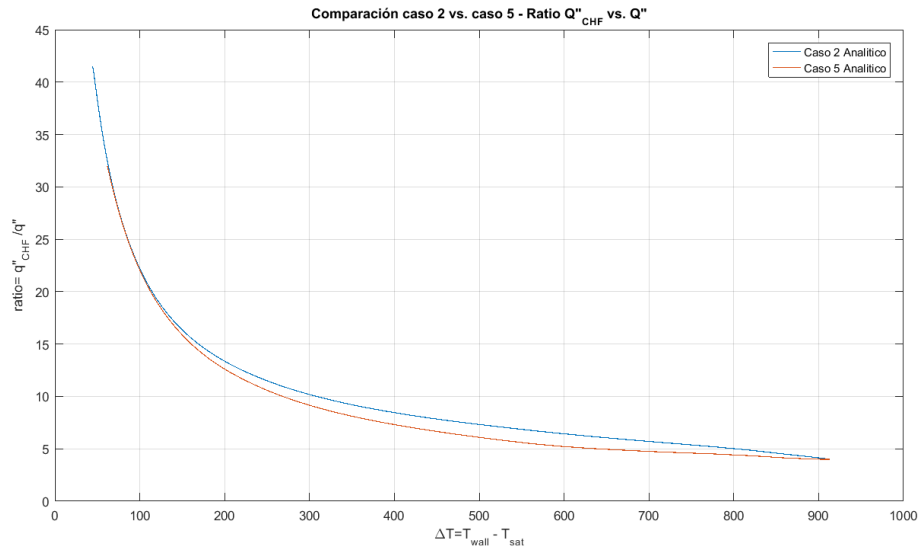


Figura 6-13.: Comparación de los CHF_{ratio} caso 2 y caso 5 en función del ΔT

Si observamos detenidamente la curva, podemos ver, que para ambos casos, la curva sigue al igual que en el análisis anterior, la misma evolución. Con lo cual, si continuamos con la misma línea de análisis, podemos decir que la elección entre volante de inercia u otro no representa una diferencia significativa.

6.1.4. Análisis y Discusiones

Como se observó en cada uno de los gráficos, las evoluciones obtenidas de forma analítica se corresponden con las obtenidas mediante el cálculo. Sin embargo, en todos los casos se observa que la evolución obtenida por el código, se encuentra siempre, desplazada por encima de las evoluciones obtenidas de forma analítica. Este hecho se debe a que el código emplea

distintas aproximaciones para realizar los cálculos optando siempre por la opción más conservativa.

Otro detalle que se observó, y en el cual se hizo hincapié a lo largo del capítulo fue el hecho del intervalo de tiempo que se utilizó, el cual se mantuvo constante para cada simulación y no se modificó. En términos de este factor, es importante destacar la importancia que cumple en términos de la confiabilidad de los resultados, puesto que la capacidad del software para resolver los espacios intermedios se puede ver afectada, tal como se observó en los distintos gráficos.

En relación a ello y a los casos analizados, se llegó a la conclusión de que probablemente el código resuelve mejor este intervalo de tiempo cuando se trata de inercias muy grandes, puesto que el fenómeno requiere lapsos de tiempo más grandes para desarrollarse.

Sin embargo, cuando se habla de inercias muy pequeñas se comienzan a ver dificultades en el código para resolver los mismos intervalos de tiempo, y ello se debe fundamentalmente al hecho de que el fenómeno en cuestión se desarrolla muy rápido.

Es importante mencionar que no se descarta el hecho, de que, al tratarse de intervalos de tiempo muy chicos, puedan existir otros fenómenos termo hidráulicos. Sin embargo, las variaciones observadas en los parámetros de control como presión y temperatura son muy chicas, con lo cual no representarían un problema en términos de seguridad. Estos otros fenómenos, de existir, no fueron tratados en este informe.

Si nos enfocamos en los últimos gráficos de este capítulo, podemos observar que la evolución del CHF_r en el tiempo, tanto para el caso 2 como para el caso 5, es muy similar. Si bien la evolución del CHF_r para el caso 5 se encuentra desplazada un poco por debajo de la evolución del caso 2, este desplazamiento es mínimo; y es motivo suficiente para demostrar el hecho de que no se justifica implementar un volante de inercia mayor a $1kg/m^2$, puesto que en términos de seguridad no representa diferencias significativas optar por el uso de un volante de mayor inercia.

En este punto es importante destacar que un volante de inercia mayor, posee ciertas desventajas en su implementación. El uso de grandes volantes de inercia implica una masa mayor y por lo tanto una mayor cantidad de energía para poner la bomba en funcionamiento, siendo poco viable desde el punto de vista económico.

Además, el uso de volantes de inercia rotatorios durante largos periodos de tiempo afectan la confianza en el dispositivo, ya que la probabilidad de falla del mismo en el tiempo es mayor. Es por ello, que estas desventajas sumadas al motivo anterior, fortalecen la idea de implementar el volante de inercia de $1kg/m^2$ en lugar de uno mayor.

7. Capítulo 7

7.1. Conclusiones

Este trabajo se realizó con la finalidad de lograr la integración de conceptos vistos a lo largo de la carrera de Ingeniería nuclear con orientación en aplicaciones del Instituto Dan Beninson y la capacitación en términos de los fenómenos termo hidráulicos que acontecen en una instalación, a fin de adquirir experiencia en la dinámica de un reactor o instalación y los sistemas de seguridad involucrados. Esto último implica el análisis y simulación de transitorios; y para ello, se implementó el código de planta RELAP versión 3.2.2 beta.

El trabajo se basó en el sistema LOOP del RA-10, y su objetivo se centro en dos ejes fundamentales. Por una lado se pretendió analizar el estado estacionario del LOOP en el modo rampa, para un dado perfil de potencia y sin considerarse rampas de potencia en el tiempo.

Este análisis se realizó a fin de comprender los fenómenos termo hidráulicos en el sistema en el caso de que suceda un dado evento. Y, por otro lado, se analizó el caso de un transitorio, en particular de un LOFA, con falla en la válvula clapeta del SPARPL. En este último caso se pretendió analizar la evolución del sistema frente a este evento en términos de distintos parámetros termo hidráulicos y la sensibilidad del sistema frente a distintos volantes de inercia.

En el análisis del LOOP en estado estacionario, se analizó el sistema en función de ciertos parámetros de entrada y se definieron las condiciones de salida del refrigerante, determinándose así, las temperaturas de pared de vaina (lo cual resulta ser un dato relevante en el caso de un transitorio como un LOFA o un LOCA) y la temperatura central del combustible (el cual resulta ser un parámetro crítico por ejemplo, en términos de mecánica en el diseño).

El cálculo se realizó de forma analítica, observándose que los resultados obtenidos, si bien se supusieron muchas aproximaciones en el mismo, resultaron ser muy similares a los obtenidos mediante los códigos de cálculo termo hidráulicos. Mediante el cálculo analítico, se alcanzó una temperatura central del combustible de $2268,61^{\circ}\text{C}$ y una temperatura de pared de vaina

de 331,86°C en la zona más caliente del MI, mientras que mediante el código (datos obtenidos a partir de la IT [23]) se obtuvo una temperatura central del combustible de 2183°C y una temperatura de pared de la vaina de 337°C.

Como se explicó en el capítulo correspondiente, las variaciones observadas se deben a que durante el cálculo se asumieron ciertas variables constantes como los coeficientes de transferencia de calor dentro del elemento combustible.

Por otro lado, al aplicar la correlación de Dittus-Boelter para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección, se realizó un cálculo iterativo hasta que la constante convergió en un dado valor. Como el momento en que se deja de iterar es arbitrario, el cálculo es aproximado y guarda un cierto error, siendo éste cada vez menor a medida que el número de iteraciones aumenta. Este proceso, junto con las aproximaciones consideradas para los coeficientes de transferencia de calor y de calor específico, contribuyó a las variaciones observadas en los resultados.

A pesar de esto, se pudo observar que se llegó a la misma distribución de temperaturas. Y que, para obtener resultados con una diferencia menor de la obtenida, en términos de temperatura, habría que ajustar parámetros relacionados con las constantes de los materiales y fluidos en cuestión que, a su vez, son parámetros fuertemente dependientes de la temperatura.

En términos del transitorio, se analizó en primera instancia la evolución del sistema-LOOP frente a un LOFA con falla en la clapeta del SPARPL, y se observó lo siguiente:

- El evento tiene lugar a los 200 segundos una vez comenzada la simulación, como consecuencia baja la presión y el caudal en el sistema (tanto MI como SPTC).
- En todos los casos se observa que la evolución obtenida por el código, se encuentra siempre, desplazada por encima de las evoluciones obtenidas de forma analítica.
- Se observaron una serie de fluctuaciones para los casos de menor inercia. La cantidad y magnitud de las mismas decrece a medida que se utilizan volantes de inercia mayores en el cálculo.

El intervalo de tiempo que se utilizó fue de 5 segundos, y se mantuvo constante para cada simulación sin ser modificado. En términos de este factor, es importante destacar la importancia que cumple en términos de la confiabilidad de los resultados, puesto que la capacidad del software para resolver los espacios intermedios se puede ver afectada. En relación a ello y a los casos analizados, se llegó a la conclusión de que probablemente el código resuelve mejor

este intervalo de tiempo cuando se trata de inercias muy grandes, puesto que el fenómeno requiere lapsos de tiempo más grandes para desarrollarse. En el caso particular de inercias chicas se logran ver las dificultades que presenta el código para resolver los mismos intervalos de tiempo, y ello se debe fundamentalmente al hecho de que el fenómeno en cuestión se desarrolla muy rápido.

Es importante mencionar que no se descarta el hecho, de que, al tratarse de intervalos de tiempo muy chicos, puedan existir otros fenómenos termo hidráulicos. Sin embargo, las variaciones observadas en los parámetros de control como presión y temperatura son muy chicas, con lo cual no representarían un problema en términos de seguridad. Estos otros fenómenos, de existir, no fueron tratados en este informe.

Por último, se analizó la evolución del sistema en términos del CHF_r y se compararon dos bombas de distinto volante de inercia en términos de este parámetro. Como resultado se pudo observar que:

- A medida que la temperatura de pared de vaina aumenta y se aleja de la temperatura de saturación del refrigerante, el ratio decrece, puesto que el flujo de calor de la pared hacia el refrigerante aumenta como consecuencia de la disminución en el caudal de refrigeración.
- Se pudo observar que la evolución CHF_r en el tiempo, tanto para el caso 2 como para el caso 5, es muy similar (la evolución del ratio para el caso 5 se encuentra desplazada un poco por debajo de la evolución del caso 2).

Si bien la evolución del CHF_r para el caso 5 se encuentra desplazada un poco por debajo de la evolución del caso 2, este desplazamiento es mínimo; y es uno de los motivos empleados para demostrar el hecho de que no se justifica implementar un volante de inercia mayor a $1kg/m^2$, puesto que en términos de seguridad no representa diferencias significativas.

En este punto es importante destacar que un volante de inercia mayor, posee ciertas desventajas en su implementación.

El uso de grandes volantes de inercia implica una masa mayor y por lo tanto una mayor cantidad de energía para poner la bomba en funcionamiento, siendo poco viable desde el punto de vista económico.

Además, el uso de volantes de inercia rotatorios durante largos periodos de tiempo afectan la confianza en el dispositivo, puesto que la probabilidad de falla del mismo en el tiempo es

mayor. Es por ello, que estas desventajas sumadas al motivo anterior, fortalecen la idea de implementar volantes de inercia lo más chicos posible .

Por último , cabe mencionar un detalle importante que se tuvo en cuenta durante todo el desarrollo del informe, y es que el código, además de realizar sus propias aproximaciones, implementa distintos tipos de correlaciones quedándose con la que resulta más conservativa desde el punto de vista de la seguridad según el caso, con lo cual parte de las variaciones observadas en el cálculo se deben a este hecho, y por lo tanto, los valores obtenidos por medio del software no dejan de ser valores que se aproximan a la realidad.

A. Anexo: Interpretación y ejecución de un input en RELAP

El siguiente documento tiene por objetivo la comprensión de un input propio de RELAP. Dicho documento se basa en la información extraída a partir del manual del software y en el uso del mismo.

A.1. Componentes hidro dinámicos

Los componentes representan los volúmenes hidro dinámicos a modelar, en función de ello se determinan las condiciones de borde con las cuales debe cumplir el mismo, como así también, se definen cuales serán las características que posee y el recorrido que realiza.

A.1.1. Time Dependent Volume (TMDPVOL - TDP) - Volumen dependiente del tiempo

Representa la condición de contorno para fluido entrante o saliente del sistema (pueden usarse también para modelar la fuente y el sumidero para recirculación, el sumidero del LOCA, la turbina y la alberca de supresión).

Para definir un Time Dependent Volume se utiliza la tarjeta ccc0000 con la palabra TMDPVOL, donde ccc corresponde al código de tres números que identifica al volumen.

Las tarjetas de geometría corresponden a la seriación ccc0101-ccc0109, donde ccc es el número de volumen, y los últimos dos dígitos, 01 a 09, corresponden al posible uso de una tarjeta.

Se asignan las siguientes palabras a las tarjetas de geometría:

- W1 (correspondiente a ccc0101): área del flujo del volumen (m²). En general, se recomienda que el área de la sección transversal del volumen dependiente del tiempo sea

grande en comparación con el área de la unión normal.

- W2 (correspondiente a ccc0102): longitud del volumen (m).
- W3 (correspondiente a ccc0103): volumen del volumen (m³) $W3=W1*W2$ para un volumen cúbico, y generalmente se ingresa como 0 en el input, siendo calculado por el código.
- W4 (correspondiente a ccc0104): ángulo azimutal. En grados, es utilizado para definir la orientación del elemento en los diagramas.
- W5 (correspondiente a ccc0105): ángulo de inclinación (en grados, varía entre los 90°y -90°) del elemento.
- W6 (correspondiente a ccc0106): cambio en la elevación del volumen. En metros, menor a la longitud del volumen.
- W7 (correspondiente a ccc0107): rugosidad de las paredes (m) del volumen.
- W8 (correspondiente a ccc0108): diámetro hidráulico (m).
- W9 (correspondiente a ccc0109): Indicadores de control de volumen. Esta palabra tiene el formato tlpvbf. Para el componente de volumen dependiente del tiempo, el indicador de control de volumen está restringido al formato 0000000 (7 ceros). Se ingresa cero para esta palabra.

Es necesario especificar las propiedades de la tarjeta de control correspondiente a la serie ccc0200. Una vez definida esta tarjeta se pueden definir los datos termodinámicos a utilizar por el volumen mediante la seriación de tarjetas del ccc0201 a ccc0299. Se asignan las siguientes palabras a la tarjeta ccc0200:

- W1 Esta palabra tiene el formato ebt. Donde:
 - e: Especifica el fluido con el cual se está trabajando. Por ejemplo, e=0 representa el fluido por default del sistema, mientras que e=1 representa H₂O y e=2 D₂O, etc
 - b: Indica la presencia de boro en el fluido. Por ejemplo, b=0 especifica que el volumen no contiene boro, mientras que b=1 especifica que una concentración de boro en masa de boro por masa de agua líquida (que puede ser 0) ingresa después de la otra información termodinámica requerida.

- t: Se utiliza para especificar que palabras de ccc0201-ccc0299 se utilizaran para definir el estado termodinámico inicial del sistema. Los valores de t de 0 a 3 definen propiedades para un fluido de un solo componente (vapor/agua), mientras que valores de t de 4 a 6 se usan para definir dos componentes (vapor / agua y gas no condensable).
 - Para t=0 las palabras w2, w3, w4 y w5 de las tarjetas de ccc0201 hasta ccc0299 se interpretaran como Presión (Pa), energía interna especifica del líquido (J/kg), energía interna especifica del vapor (J/kg) y la fracción de vacío del vapor, respectivamente. (Estas condiciones se pueden interpretar como condiciones de equilibrio o de no equilibrio dependiendo de las energías internas usadas para definir el estado termodinámico. Se puede ingresar boro en W6 si es necesario).
 - Para t=1 las palabras w2 y w3 de estas tarjetas especifican el uso de temperatura (K) y calidad en condiciones de equilibrio, respectivamente. (Se puede ingresar boro en W4 si es necesario).
 - Para t=2 las palabras w2 y w3 especifican el uso de presión (Pa) y calidad en condiciones de equilibrio, respectivamente. (Se puede ingresar boro en W4 si es necesario).
 - Para t=3 las palabras w2 y w3 especifican el uso de presión (Pa) y temperatura (K) en condiciones de equilibrio, respectivamente. (Se puede ingresar boro en W4 si es necesario).

Nota: Para fluidos de dos componentes no se desarrollará la explicación, ver sección A9.4.2 – “Two Components (Steam/Water/Air), Non-equilibrium” - del manual (“InputManual”).

Para las tarjetas ccc0201 hasta ccc0299 se utilizan las siguientes palabras:

- W1 variable de búsqueda de la tarjeta ccc0200, suele ser el tiempo a no ser que se indique lo contrario en la tarjeta correspondiente.
- W2-W7: palabras definidas en ccc0200 a partir de t.

A.1.2. Time Dependent Junction (TMDPJUN) - Unión dependiente del tiempo

Este componente representa la condición de contorno o borde de caudal/velocidad del fluido, y se define con la palabra TMDPJUN en la tarjeta ccc0000. La tarjeta ccc0101 es similar a

la misma tarjeta de la unión simple, con la diferencia de que en el volumen dependiente del tiempo solo se utilizan las primeras tres palabras.

La tarjeta ccc02000 tiene cuatro palabras:

- W1. Del código de conexión a un component (From connection code To a component). Esto se refiere al componente a partir del cual se origina la dirección de coordenadas de unión. El código de conexión es CCCVV000N, aquí CCC es el número de componente, VV es el número de volumen y N indica el número de cara. Un N distinto de cero especifica el formato expandido. El número N igual a 1 y 2 especifica la cara de entrada y salida, respectivamente, para la dirección de coordenadas del volumen (consulte la Sección 2.1). El número N igual a 3-6 especifica el flujo cruzado. El número N igual a 3 y 4 especificaría las caras de entrada y salida para la segunda dirección de coordenadas; N igual a 5 y 6 haría lo mismo para la tercera dirección de coordenadas. Para conectarse a un volumen dependiente del tiempo, N está restringido a 1 o 2. La tarjeta ccc0200 es una palabra de control utilizada para indicar los valores de la segunda y tercer palabras (W2 y W3) de las tarjetas ccc0201 a ccc0299, si es 1 las palabras de las tarjetas serán velocidades (m/s), si es 0 serán flujos máscicos (kg/s). En ambos casos, la cuarta palabra (W4) de las tarjetas es la velocidad de inter face y deberá ser puesta como cero.
- W2. Número de trip utilizado en la unión.
- W3. Variable de control utilizada en la unión.
- W4. Valor numérico de la variable de control deseada.

La palabra w1 de las tarjetas de ccc0201 a ccc0299 es la variable de búsqueda, cuando no se especifique lo contrario, esta será el tiempo.

A.1.3. Single Volume (SNGLVOL) – Volumen simple

El volumen simple o “Single Volume” representa un volumen elemental del sistema. Para indicar un volumen de este tipo se utiliza la palabra SNGVOL en la tarjeta ccc0000.

El código de conexión de unión determina la ubicación del volumen en el sistema. Se puede conectar más de una unión a una entrada o salida; y si un extremo no tiene uniones, ese extremo se considera cerrado.

Las tarjetas de ccc0101 a ccc0109 son utilizadas para las características geométricas del volumen simple, y son iguales a las utilizadas en el volumen dependiente del tiempo.

La tarjeta ccc0200 puede llegar a tener siete palabras. Es igual a la primera palabra utilizada en la misma tarjeta del volumen dependiente del tiempo. Las palabras w2 a w7 están en función del empaquetamiento definido en w1 de esta misma tarjeta. Y como se mencionó previamente, pueden adquirir los valores de distintas variables termodinámicas.

A.1.4. Single Junction (SNGLJUN) – Unión simple

Para utilizar una unión simple, se utiliza la carta ccc0000 con la palabra SNGLJUN.

Las tarjetas de características geométricas abarcan desde ccc0101 a ccc0109. Cada tarjeta involucra 9 palabras para su definición:

- W1. Indica el componente desde el cual se origina la conexión. El código de conexión es ccc000000. En un formato expandido, el código puede utilizarse como cccvv000n, donde ccc es el número del componente, vv es el número del volumen, y n indica la cara por la cual se hará la conexión.
- W2. Indica el componente hacia el cual se dirige la conexión. Aplican las mismas reglas de codificación que en w1.
- W3. Área de unión en m². Si se usa el valor de cero, el área se ajustara al área mínima del flujo de la conexión entre los volúmenes. Generalmente se ingresa un valor de área menor al área del volumen de entrada.
- W4. Indica el coeficiente de pérdida de energía cuando el flujo es hacia adelante.
- W5. Indica el coeficiente de pérdida de energía cuando el flujo es hacia atrás.
- W6. Esta palabra se utiliza para las banderas de control con el empaquetamiento efvcahs. En el caso de la conexión con la vasija, los valores se ponen en ceros ya que no se utilizaran los modelos que abarca esta palabra.
- W7 – W9. Debido a que no se utilizaran los coeficientes que describen estas palabras, todos se pondrá en 1.0.

La tarjeta ccc0201 indica las condiciones iniciales de operación para una unión simple. Utiliza cuatro palabras para su definición:

- W1. Es la palabra de control, adquiere el valor 1 si la siguiente palabra (W2) es una velocidad (m/s) o 0 si W2 representa un flujo másico (kg/s).
- W2. Flujo másico o velocidad inicial del líquido.
- W3. Flujo másico o velocidad inicial del vapor.
- W4. Velocidad de la interface. Para este dato se escribe 0.0.

A.1.5. Pipe - Tubería

Para las tuberías en RELAP se utiliza el volumen llamado Pipe. Para definir este volumen se escribe la palabra PIPE en la tarjeta ccc0000.

La tarjeta ccc0001 es la tarjeta de información para la tubería, solo tiene una palabra w1 que define el número de volúmenes, mayor a 0 y menor a 100, por las que está formada una tubería (el número de uniones internas entre volúmenes es igual al número de volúmenes menos uno).

- **Área del flujo:** Las tarjetas de ccc0101 a ccc0109 definen las áreas de flujo en el eje X. Utiliza dos palabras: w1 para definir el área del flujo en m² y w2 para definir a que volumen interno se asocia dicha área. Las tarjetas ccc1601 a ccc1699 y ccc1701 a ccc1799 asocian a los ejes Y y Z respectivamente.
- **Longitud o largo de los volúmenes:** Las tarjetas ccc0101 a ccc0399, ccc1801 a ccc1899 y ccc1901 a ccc1999, se asocian a los ejes X, Y y Z respectivamente y describen, mediante dos palabras el largo de los volúmenes. La palabra w1 corresponde al largo del volumen de la tubería en metros, y la palabra w2 el número del volumen que se está describiendo.

Los siguientes grupos de tarjetas describen las características geométricas por volumen con el uso de dos palabras, w1 para describir la propiedad y w2 para asignar el volumen correspondiente. Para el volumen del volumen en m³ (puede omitirse si se conocen el área y el largo del volumen, sin embargo deben conocerse como mínimo dos de estas tres características) se usan las tarjetas ccc0401 a ccc0499, el ángulo azimutal (menor o igual a 360°) del volumen se describe de ccc501 a ccc0599 y para el ángulo vertical del volumen (menor o igual a 90°) se usan las tarjetas de ccc0601 a ccc0699.

Para los datos de fricción se usan las tarjetas ccc0801 a ccc0899, ccc2301 a ccc2399 y ccc2401 a ccc2499, asociadas a los ejes X, Y y Z respectivamente. Se utilizan tres palabras para su

definición, w1 como la rugosidad de pared en metros, w2 es el diámetro hidráulico en metros (suele calcularse como $4 \cdot \text{Volumen de Flujo} / \text{Perímetro Mojado}$), y w3 para definir el volumen asociado a la descripción.

Las banderas de control son diferentes entre el eje X y el juego de eje Y y Z. El eje X con tarjetas ccc1001 a ccc1099 utiliza dos palabras: w1 es un empaquetamiento de la forma tlpvbf, de estas letras, solo se requieren los valores de f, si f es igual a uno, se indica que el eje X será utilizado para el cálculo de la fricción en pared, y la letra e para especificar si se usara el modelo de no equilibrio para temperaturas variantes, o el de equilibrio para una misma temperatura en los volúmenes. En el caso de las tarjetas ccc2701 a ccc2799 y ccc2801 a 2899, respectivos al eje Y y Z, solo se utiliza la bandera f, para indicar sobre que eje se calculara la fricción de pared.

Una vez definidas las características geométricas del volumen PIPE, se deben especificar sus condiciones iniciales de operación. Estas se especifican en las tarjetas de ccc1201 a ccc1299. Existen 7 palabras por tarjeta, el valor de las palabras de 2 a 6 está en función de la palabra de control ebt en w1: el valor e define el fluido de trabajo a utilizar, b indica la presencia de boro y t las propiedades termodinámicas a considerar como condiciones iniciales, donde t de 0 a 3 especifica un componente como fluido de trabajo y t de 4 a 6 indica dos componentes. En el modelo se utilizara $e = 1$, por ser el valor correspondiente al H₂O; $b = 0$ ya que no hay presencia de boro; y $t = 3$, con este valor las palabras w2 y w3 se asumen como presión (Pa) y temperatura (K) en condiciones de equilibrio, las palabras w5 – w6 adquieren el valor de 0.0. La palabra w7 indica el número de volumen de la tubería al cual se le asignara la tarjeta definida.

A.1.6. Valve - Válvula

Se escribe la palabra VALVE en la tarjeta ccc0000 para indicar que el componente a utilizar es una válvula. Las características geométricas del componente quedan descritas por las nueve palabras que componen cada tarjeta desde ccc0101 hasta ccc0109, y son similares en cada palabra a las utilizadas en las uniones simples. También la tarjeta ccc0201 es igual a la utilizada en la unión simple.

Para especificar el tipo de válvula que se está utilizando, se utiliza la tarjeta ccc0300 y solo cuenta con una palabra. La palabra w1 puede adquirir los valores de CHKVLV para una válvula check, TRPVLV para una válvula trip, INRVLV para una válvula check de giro iner-

cial, MTRVLV para una válvula motorizada, SRVVLV para una servo válvula y RLFVLV para una válvula de alivio.

Según el tipo de válvula seleccionado serán las condiciones de inicio de operación que especifican las tarjetas ccc0301 a ccc0399. En el caso de las válvulas ADS se utilizaran válvulas del tipo disparo (en RELAP se refiere a las tipo TRIP especificadas por TRPVLV), y las válvulas rompedoras de vacío corresponden a válvulas tipo check (CHKVLV en RELAP).

En el caso de las válvulas check, una tarjeta de condiciones iniciales tiene cuatro palabras:

- w1 indica el tipo de válvula check que se utilizara, +1 para una válvula estática controlada por presión sin efecto de histéresis, 0 para una válvula controlada por presión o flujo con efecto de histéresis, -1 para una válvula estática o dinámica controlada por presión con efecto de histéresis, en este caso se utilizara 0 ya que son las válvulas más estables para el análisis;
- w2 se usa para especificar la posición inicial de la válvula, cero si esta inicialmente abierta o 1 si está cerrada;
- w3 es la contrapresión de cierre en Pa; y
- w4 es la relación de fuga, entendida esta como la fracción de fuga del área de unión entre componentes cuando la válvula está cerrada, se usara cero.

Las válvulas de disparo usan la tarjeta de condición inicial de operación con solo una palabra. La palabra w1 es el número de disparo, este se especifica en las condiciones de disparo para la operación del ADS. Si el disparo es verdadero la válvula se abre, si es falso se cerrara.

A.1.7. Branch - Distribuidor

El distribuidor se especifica con la palabra BRANCH en la tarjeta ccc0000. Tiene uniones múltiples de entrada y salida y usualmente se utiliza para conectar tuberías.

La tarjeta ccc0001 se utilizara para definir el número de uniones y las condiciones iniciales de las mismas. La primer palabra w1 es el número de uniones que se desprenden del branch, ya sean entradas o salidas. La palabra w2 indica la condición inicial, si es 0 se asumirá que la primer y segunda palabra de la tarjeta cccn201 (donde n es el número de unión) serán velocidades, de ser diferente de cero serán flujos máxicos, la tercer palabra de cccn201 es la

velocidad de interface y se escribe como cero.

Las tarjetas de ccc0101 a ccc0109 son las tarjetas de datos geométricos en el eje X, contienen nueve palabras, puede usarse una tarjeta con las nueve, o cada tarjeta para una palabra. Son iguales a los de un volumen dependiente del tiempo.

La tarjeta ccc0200 se utiliza para definir las condiciones iniciales del branch, y es igual a la tarjeta con la misma nomenclatura de un volumen simple. Las tarjetas de cccn101 a cccn109 (donde n es el número de unión), son las tarjetas utilizadas para definir las condiciones geométricas de las uniones, el valor de n se utiliza para definir la unión. Y son iguales a la tarjeta ccc0101 de una unión simple hasta la palabra siete. En el caso del branch, w7 a w9 son requeridos.

A.2. Estructuras de calor

Las estructuras de calor representan las estructuras a través de las cuales fluye el fluido y sus características. Dichas estructuras contienen la información del material a través del cual fluye el calor. En el caso particular de los elementos combustibles, se modela la estructura por medio de mallas, definiendo los materiales que lo componen y sus características (pellet, gap y vaina).

En las mismas se define como serán las relaciones de estas con los volúmenes termodinámicos, pudiendo establecerse la relación con más de un volumen de forma simultánea.

A.2.1. Cómo definir una estructura de calor

Los números de tarjeta de estructura de calor tienen el formato 1CCCGXNN donde los campos se definen de la siguiente manera:

- CCC es un número de estructura de calor. Generalmente lleva el mismo número del volumen termodinámico al cual está asociado.
- G es un número de geometría. La combinación CCCG es una combinación de geometría de estructura de calor a la que se hace referencia en los datos de entrada de la estructura de calor. El dígito G se proporciona para diferenciar entre los diferentes

tipos de estructuras de calor (como las clavijas de combustible y el núcleo del barril) que podrían estar asociadas con el mismo volumen hidrodinámico.

- X es el tipo de tarjeta.
- NN es el número de tarjeta dentro de un tipo de tarjeta.

A.2.2. Información contenida dentro de la tarjeta “Estructura de calor” 1CCCG000

El input usa 8 palabras para crear la tarjeta. Las palabras son las siguientes:

- W1. Número de estructuras de calor en dirección axial con las mismas características. El número permitido es ¡0 y ¡100.
- W2. Número de mallas en la dirección radial (np).
- W3. Tipo de geometría. Se indica el valor 1 para geometría rectangular, el valor 2 para geometría cilíndrica y el valor 3 para geometría esférica (la geometría esférica no está permitida si hay reflujo). La geometría cilíndrica se puede usar cuando se usa el modelo de conducción en el gap.
- W4. Indicador de inicialización de estado estacionario. Se indica con el valor 0 si se ingresa la temperatura como condición inicial de entrada en la tarjeta 1CCCG401-G499; de lo contrario se ingresa el valor 1 para que el código calcule las temperaturas. Si se elige la opción 1, aún se requiere que el usuario ingrese las temperaturas en las tarjetas 1CCCG402-G499 (En este caso, las temperaturas se utilizan como puntos de partida para las soluciones de estado estacionario. Por lo tanto, el usuario debe ingresar temperaturas por debajo o por encima del punto de ebullición mínimo de la película para garantizar que se calcule la condición de estado estacionario anterior a DNB o posterior a DNB. Esto se debe a que la curva de ebullición tiene múltiples valores).
- W5. Coordenada de limite izquierdo (m).
- W6. Tarjeta de condición de reflujo. Es una tarjeta opcional si no se calcula la condición de reflujo. Esta cantidad puede ser 0, 1, 2 o un número de disparo.
 - Si es 0, no se realizará ningún cálculo de reflujo.
 - Si no es cero, se supone que todas las estructuras de calor en esta estructura / geometría de calor forman una representación bidimensional de un pin de combustible. (La malla radial se define en la tarjeta 1CCCG1NN. Cada estructura de

calor representa un nivel axial del pin combustible, con la primera estructura de calor en el nivel inferior. Cada estructura de calor debe conectarse a un volumen hidrodinámico que represente la misma sección axial del canal de refrigerante. La longitud de la malla axial en el pin combustible está dada por la altura del volumen hidrodinámico conectado. Si la estructura de calor son pins combustibles o tubos intercambiadores de calor, el factor de longitud (Palabra 5 en las tarjetas 1CCCG501-G509) es el producto de la longitud del volumen hidrodinámico y la cantidad de pins o tubos (ver Sección 3.2 del manual). Las estructuras de calor representan las temperaturas en el punto medio de la malla axial. Una vez que se inicia el cálculo de reflujo, se introducen líneas de malla adicionales en cada extremo del pin combustible y entre las estructuras de calor. Una vez que se inicia el cálculo de reflujo, permanece activado y el cálculo de conducción de calor bidimensional usa un mínimo de $2 \bullet nh + 1$ nudos de malla axial. Se introducen líneas de malla adicionales y luego se eliminan según sea necesario para seguir el frente de enfriamiento rápido).

- Si se ingresa 1, el cálculo de reflujo se inicia en esta geometría de estructura de calor cuando la presión promedio en los volúmenes hidrodinámicos conectados es menor de 1.2×10^6 Pa, y la fracción de vacío promedio en los volúmenes hidrodinámicos interconectados es mayor que 0.9 (es decir, casi vacío).
 - Si se ingresa 2, el cálculo de reflujo inicia en esta geometría de estructura de calor cuando la presión promedio en los volúmenes hidrodinámicos conectados es menor a 1.2×10^6 Pa y la fracción de vacío promedio en los volúmenes hidrodinámicos interconectados es mayor a 0.1 (es decir, comienza el secado)
 - Si se ingresa un número de trip o de disparo, el cálculo de reflujo se inicia cuando el trip se establece como verdadero. Al usar el formato de número de trip ampliado, 1 y 2 son posibles números de trip. Un 1 o 2 ingresado en esta palabra no se trata como un número de trip.
- W7. Indicador de volumen de frontera. Se ingresa el valor 0 o 1 para indicar que la transferencia de calor de reflujo se aplica al límite izquierdo o al derecho, respectivamente.
 - W8. Número máximo de intervalos axiales. Se ingresa el valor 2, 4, 8, 16, 32, 64 o 128 para indicar la cantidad máxima de subdivisiones axiales que puede tener una estructura de calor. El almacenamiento se asigna para el número indicado, aunque un transitorio no requiera ese nivel de subdivisión.

A.2.3. Indicador de malla de estructura de calor - Heat Structure Mesh Flags - 1CCCG100

Esta tarjeta es necesaria para la entrada de la estructura de calor.

- W1. Bandera de ubicación de malla. Si es 0, los datos de geometría, incluidos los datos de intervalo de malla, los datos de composición y los datos de distribución de fuente, se ingresan con esta entrada de estructura de calor. Si no es nulo, esa información se toma de los datos de geometría del número de geometría de la estructura de calor (CCCG) en esta palabra. Si esta palabra es distinta de cero, no se ingresa la información de geometría restante descrita en la Sección A10.7-Sección A10.10.
- W2. Bandera de formato de malla. Esta palabra solo es necesaria si Word 1 es 0, aunque no se produce ningún error si está presente cuando Word 1 es distinto de cero. Los datos del intervalo de malla se dan como una secuencia de pares de números en uno de los dos formatos que se utilizarán en las tarjetas 1CCCG101-G199. Si esta palabra es 1 (formato 1 en las tarjetas 1CCCG101-G199), los pares de números contienen el número de intervalos en esta región y la coordenada de límite derecha. Para el primer par, la coordenada izquierda de la región es la coordenada de límite izquierda previamente ingresada en Word 5 de la tarjeta 1CCCG000; para los pares sucesivos, la coordenada izquierda es la coordenada derecha del par anterior. Si esta palabra es 2 (formato 2 en las tarjetas 1CCCG101-G199), el formato es una expansión secuencial de intervalos de malla; es decir, la distancia en Word 1 en las tarjetas 1CCCG101-G199 se usa para cada intervalo que comienza desde el intervalo más a la izquierda, aún no especificado, e incluyendo el número de intervalo especificado en Word 2.

A.2.4. Formato para el número de intervalos de malla, 1CCCG101-G199

Estas cartas son necesarias si la palabra 1 de la tarjeta 1CCCG100 es 0. La suma de los números de intervalos debe ser np menos 1 (en donde np es el numero de mallas radial).

- W1. Cantidad de intervalos.
- W2. Coordenada derecha (m).

A.2.5. Datos de la composición de la estructura de calor, 1CCCG201-G299

Esta tarjeta es solo necesaria si la palabra w1 de la tarjeta 1CCCG100 es 0. El formato de tarjeta es dos números por conjunto en formato de expansión secuencial para intervalos np menos 1.

- W1. Número de composición. El valor absoluto de esta cantidad es el número de composición, y debe ser idéntico al subcampo MMM utilizado en los datos de propiedades térmicas de la estructura de calor (sección A12 del manual). El signo indica si la región sobre la que se aplica esta composición debe incluirse o excluirse del cómputo de temperatura promediada en volumen. Si es positivo, la región está incluida; si es negativo, la región no está incluida. La opción de excluir regiones de la integración de temperatura promedio por volumen es limitar la integración a las regiones de combustible solo para el uso en los cálculos de retroalimentación de reactividad. Las regiones de Gap y de revestimiento no deberían incluirse en este caso. Si se utiliza el modelo de conductancia de hueco, solo se puede usar un intervalo para el modelo de hueco.
- W2. Número de intervalo

A.2.6. Datos de la distribución de fuente de la estructura de calor, 1CCCG301-G399

Estas tarjetas son necesarias si la palabra 1 de la tarjeta 1CCCG100 es 0. El formato de tarjeta es dos números por conjunto en formato de expansión secuencial para intervalos np-1.

Los factores de picos de potencia radial se ingresan aquí.

- W1. Valor de la fuente/source. Estos son solo valores relativos y pueden ser escalados por cualquier factor sin cambiar los resultados. Al ingresar diferentes valores para los diversos intervalos de malla, se puede describir una forma característica de una curva de potencia.
- W2. Número de intervalo de malla. Si se ingresa la tarjeta 1CCCG300, entonces la tarjeta 1CCCG301 se trata como una tarjeta de coeficiente de atenuación gamma.
- W1. Coeficiente de atenuación gamma. Estos son valores que dependen del material de estructura de calor. Se recomienda un valor de 50 para acero inoxidable.
- W2. Número de intervalo de malla.

A.2.7. Formato para ingresar datos de temperatura iniciales, 1CCCG401-99

Estas tarjetas son necesarias si la palabra 1 de la tarjeta 1CCCG400 es 0 (o no fue ingresada, lo que implica que es 0). Se ingresa una distribución de temperatura; y la misma distribución se aplica a todas las estructuras de calor “nh”. El formato de tarjeta es dos números por conjunto en formato de expansión secuencial para puntos de malla np.

- W1. Temperatura (K).
- W2. Número de punto de malla.

A.2.8. Condición de límite izquierdo o condición de borde, 1CCCG501-599

Estas tarjetas son requeridas. Los datos de condición de borde para las estructuras de calor con esta geometría se ingresan en una forma ligeramente modificada de expansión secuencial utilizando seis palabras por conjunto para el número de estructuras de calor con esta geometría (nh conjuntos). La modificación trata con las palabras 1 y 2.

- W1. Número de volumen de frontera o tabla general. Esta palabra especifica el número de volumen hidrodinámico (de la forma CCCNN000F) o la tabla general asociada con la superficie izquierda de esta estructura de calor. Estos se usan para especificar la temperatura del sumidero. Si se ingresa el valor 0, ningún volumen o tabla general estará asociado con la superficie izquierda de esta estructura de calor, y se usa una condición de simetría o borde aislado (es decir, un gradiente de temperatura 0 en el límite), o se usa una temperatura de 0 para la superficie o una temperatura de sumidero en condiciones de contorno. Un número de volumen límite se ingresa como un número positivo. Si F es 0 o 4, los valores asociados a la coordenada de volumen, como la velocidad de volumen promedio, se toman de la coordenada x; si F es 2 o 1, los valores asociados a la coordenada de volumen se toman de los ejes y o z, respectivamente. En la tabla general se ingresa como un número negativo (-1 a -999). **NOTA:** En esta traducción el término límite es igual al término borde.
- W2. Incremento. Esta palabra y la Palabra 1 (w1) de esta tarjeta se tratan de manera diferente a la expansión secuencial estándar. La palabra 1 (w1) del primer conjunto se aplica a la primera estructura de calor del conjunto de geometría de la estructura de calor. El incremento (normalmente 10000) se agrega a la palabra 1 (w1), lo que da como resultado el número de celda hidráulica asociado con la estructura de calor 2; etc.

El incremento se aplica hasta el límite en la palabra 6 (w6) de un conjunto. La palabra 1 del siguiente conjunto se aplica a la siguiente estructura de calor, y los incrementos se aplican como para el primer conjunto. El incremento puede ser 0 o distinto de cero, positivo o negativo. Si Word 1 es 0, esta palabra debería ser 0.

- W3. Tipo de condición de frontera Si es 0, se usa una condición de simetría o límite aislado (es decir, se usa un gradiente de temperatura de 0 en el límite). El volumen del límite debe ser 0. Si es 1 o 1nn, una condición de contorno convectivo donde se usa el coeficiente de transferencia de calor obtenido del paquete de transferencia de calor 1. Los valores permitidos de nn se muestran en la Tabla A10.15-1. La temperatura del sumidero es la temperatura del volumen del límite. Word 1 debe especificar un volumen de límite con este tipo de condición de límite. El volumen límite no puede ser un volumen dependiente del tiempo. Hay varios números permitidos para Word 3 para activar las condiciones de contorno convectivo para geometrías no estándar. A 1, 100 u 101 dan los valores predeterminados. Los números 1, 100 y 101 usan las mismas correlaciones. Se recomienda el número 101; los números 1 y 100 están permitidos para que el código sea compatible con versiones anteriores. Las correlaciones de convección y ebullición predeterminadas se derivaron principalmente en base a los datos del flujo de tubería vertical interna. Otros valores de entrada posibles se muestran en la Tabla A10.15-1. Al modelar un haz vertical, la relación de paso de varilla a diámetro del vástago debe ingresarse en la tarjeta 801. Esto tiene el efecto de aumentar la parte convectiva de la transferencia de calor de modo que los usuarios puedan ingresar el verdadero diámetro hidráulico y obtener predicciones razonables.

W3	Tipo de geometría
1, 100, 101	Default
102	Placas paralelas (reactor ORNL, ANS; ajuste de intervalo y vano en tarjetas hidroeléctricas CCC3101-3199 para tuberías y tarjeta hidrostática CCC0111 para volúmenes individuales y ramas, conjunto b = 2 en bandera de control de volumen en hidro tarjetas de CCC1001-1099 para tuberías y CCC0101-0109 hidro tarjetas para volúmenes únicos y ramas).
110	Paquete vertical sin flujo cruzado (establecer P / D en tarjeta 801)
111	Paquete vertical con flujo cruzado (establecer P / D en tarjeta 801)
124	Transferencia de calor del elemento del haz de combustible CANDU
130	Plato plano por encima del fluido
134	paquete horizontal

Tabla A-1.: TABLE A10.16-1 CARD 501 WORD 3 CONVECTION BOUNDARY TYPE

Si es 1000, la temperatura del volumen límite o la temperatura de la tabla general (como se especifica en la Palabra 1) se usa como la temperatura de la superficie izquierda. Si Word 1 es 0, la temperatura de la superficie se establece en 0.

- Si es 1ccc, la temperatura en general Tabla ccc se usa como la temperatura de la superficie izquierda.
 - Si es 2ccc, el flujo de calor de la Tabla ccc se usa como la condición de límite izquierdo.
 - Si 3ccc, se usa una condición de contorno convectivo donde el coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo se obtiene de la Tabla general ccc. La temperatura del sumidero es la temperatura del volumen límite o de la tabla especificada en Word 1. Si Word 1 es 0, la temperatura del fregadero se establece en 0.
 - Si 4ccc, se usa una condición de contorno convectivo donde el coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura de la superficie se obtiene de la Tabla general ccc. La temperatura del sumidero es la temperatura del volumen límite o de la tabla especificada en Word 1. Si Word 1 es 0, la temperatura del fregadero se establece en 0.
 - Si se especifica reflood, el tipo de condición de límite izquierdo debe ser el mismo para todas las estructuras de calor nh y, de manera similar, para el tipo de condición de límite derecho. Los tipos de límite izquierdo y derecho no necesitan ser iguales, pero tampoco pueden ser 1000 o 1ccc.
- W4. Código de área superficial Si es 0, Word 5 es el área de superficie izquierda. Si 1, Word 5 es (a) el área de superficie en geometría rectangular, (b) la altura del cilindro o equivalente en geometría cilíndrica, o (c) la fracción de una esfera (0.5 es un hemisferio) en geometría esférica.
 - W5. Área o factor de superficie Como se indica en la palabra 4, esta palabra contiene el área de la superficie (m², ft²) o un multiplicador dependiente de la geometría (m², ft²) para rectangular; (m, ft) para cilíndrico; o adimensional para geometrías esféricas). Si se especifica la condición de límite de simetría (Palabra 3 = 0), esta palabra todavía se debe ingresar distinto de cero.
 - W6. Número de estructura de calor

A.2.9. Condición de límite derecho, 1CCCG601-G699

Estas tarjetas son requeridas. Las áreas de superficie izquierda y derecha deben ser compatibles con la geometría. Los datos de condición de límite para las estructuras de calor con esta geometría se ingresan en una forma ligeramente modificada de expansión secuencial utilizando seis cantidades por conjunto para el número de estructuras de calor con esta geometría (nh conjuntos). La modificación trata con las palabras 1 y 2.

- W1. Número de volumen de límite o tabla general. Esta palabra especifica el número de volumen hidrodinámico (de la forma CCCNN000F) o la tabla general asociada con la superficie derecha de esta estructura de calor. Estos se usan para especificar la temperatura del fregadero. Si 0, no hay volumen o tabla general asociada con la superficie derecha de esta estructura de calor, y se usa una condición de simetría o límite aislado (es decir, un gradiente de temperatura 0 en el límite), o una temperatura de 0 se utiliza para una superficie temperatura o una temperatura de sumidero en condiciones de contorno. Un número de volumen límite se ingresa como un número positivo. Si F es 0 o 4, los valores asociados a la coordenada de volumen, como la velocidad de volumen promedio, se toman de la coordenada x; si F es 2 o 1, los valores asociados a las coordenadas de volumen se toman de los ejes y o z, respectivamente. Especificar una coordenada de volumen que no esté en uso es un error de entrada. Una tabla general se ingresa como un número negativo (-1 a -999).
- W2. Incremento. Esta palabra y la Palabra 1 de esta tarjeta se tratan de manera diferente a la expansión secuencial estándar. La palabra 1 del primer conjunto se aplica a la primera estructura de calor del conjunto de geometría de la estructura de calor. El incremento (normalmente 10000) se agrega a la Palabra 1, lo que da como resultado el número de celda hidráulica asociado con la estructura de calor 2; etc. El incremento se aplica hasta el límite en Word 6 de un conjunto. La palabra 1 del siguiente conjunto se aplica a la siguiente estructura de calor, y los incrementos se aplican como para el primer conjunto. El incremento puede ser 0 o distinto de cero, positivo o negativo. Si Word 1 es 0, esta palabra debería ser 0. Se muestran ejemplos adicionales en la Sección 4 del Volumen V.
- W3. Tipo de condición de frontera
 - Si es 0, se usa una condición de simetría o límite aislado (es decir, se usa un gradiente de temperatura de 0 en el límite). El volumen del límite debe ser 0.
 - Si es 1 o 1nn, una condición de contorno convectivo donde se usa el coeficiente de transferencia de calor obtenido del paquete de transferencia de calor 1. Los valores

permitidos de nn se muestran en la Tabla A10.15-1. La temperatura del sumidero es la temperatura del volumen del límite. Word 1 debe especificar un volumen de límite con este tipo de condición de límite. El volumen límite no puede ser un volumen dependiente del tiempo.

Hay varios números permitidos para Word 3 para activar las condiciones de contorno convectivo para geometrías no estándar. A 1, 100 u 101 dan los valores predeterminados. Los números 1, 100 y 101 usan las mismas correlaciones. Se recomienda el número 101; los números 1 y 100 están permitidos para que el código sea compatible con versiones anteriores. Las correlaciones de convección y ebullición predeterminadas se obtuvieron principalmente a partir de los datos del flujo de tubería vertical interno. Otros valores de entrada posibles se muestran en la Tabla A10.16-1. Al modelar un haz vertical, la relación paso a diámetro de la varilla o del tubo debe ingresarse en la tarjeta 901. Esto tiene el efecto de aumentar la parte convectiva de la transferencia de calor de modo que los usuarios puedan ingresar el verdadero diámetro hidráulico y obtener predicciones razonables.

W3	Tipo de geometría
1,100,101	Default
102	Placas paralelas (reactor ORNL, ANS; ajuste de intervalo y vano en tarjetas hydro CCC3101-3199 para tuberías y tarjeta hidro CCC0111 para un solo volumen y ramas, conjunto b = 2 en bandera de control de volumen en tarjetas hidro de CCC1001-1099 para tuberías y CCC0101- 0109 tarjetas hidro para volúmenes y ramas individuales).
110	Paquete vertical sin flujo cruzado (establecer P / D en tarjeta 901)
111	Paquete vertical con flujo cruzado (establecer P / D en tarjeta 901)
124	Transferencia de calor del elemento del haz de combustible CANDU
130	Plato plano por encima del fluido
134	paquete horizontal

Tabla A-2.: TABLE A10.16-1 CARD 501 WORD 3 CONVECTION BOUNDARY TYPE

Si es 1000, la temperatura del volumen límite o la temperatura de la tabla general (como se especifica en la Palabra 1) se usa como la temperatura correcta de la superficie. Si Word 1 es 0, la temperatura de la superficie se establece en 0.

- Si es 1ccc, la temperatura en general Tabla ccc se usa como la temperatura correcta de la superficie.

- Si es 2ccc, el flujo de calor de la Tabla ccc se usa como la condición de límite correcto.
 - Si 3ccc, se usa una condición de contorno convectivo donde el coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo se obtiene de la Tabla general ccc. La temperatura del sumidero es la temperatura del volumen límite o de la tabla especificada en Word 1. Si Word 1 es 0, la temperatura del fregadero se establece en 0.
 - Si 4ccc, se usa una condición de contorno convectivo donde el coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura de la superficie se obtiene de la Tabla general ccc. La temperatura del sumidero es la temperatura del volumen del límite o de la tabla especificada en Word 1. Si Word1 es 0, la temperatura del fregadero se establece en 0.
 - Si se especifica reflood, el tipo de condición de límite correcto debe ser el mismo para todas las estructuras de calor nh y, de forma similar, para el tipo de condición de límite izquierdo. Los tipos de límite izquierdo y derecho no necesitan ser iguales, pero tampoco pueden ser 1000 o 1ccc.
- W4. Código de área superficial. Si es 0, Word 5 es el área de superficie correcta. Si 1, Word 5 es (a) el área de superficie en geometría rectangular, (b) la altura del cilindro o equivalente en geometría cilíndrica, o (c) la fracción de una esfera (0.5 es un hemisferio) en geometría esférica.
 - W5. Superficie o factor de superficie. Como se indica en la palabra 4, esta palabra contiene el área de la superficie (m², ft²) o un multiplicador dependiente de la geometría (m², ft²) para rectangular; (m, ft) para cilíndrico; o a dimensional para geometrías esféricas). Si se especifica la condición de límite de simetría (Palabra 3 = 0), esta palabra todavía se debe ingresar distinto de cero.
 - W6. Número de estructura de calor.

A.2.10. Datos de la fuente, 1CCCG701-G799

Estas tarjetas son necesarias para los datos de estructura de calor. El formato de la tarjeta es un formato de expansión secuencial, cinco palabras por conjunto, que describe nh estructuras de calor.

- W1. Tipo de fuente. Si es 0, no se usa ninguna fuente. Si un número positivo es menor que 1000, se utiliza la potencia de la tabla general con este número como fuente. Si es

1000-1004, el número tiene la forma 100t, y la fuente se toma de un cálculo de cinética de punto. El campo $t = 0$ especifica la potencia total del reactor, $t = 1$ especifica la potencia de decaimiento total, $t = 2$ especifica la potencia de fisión, $t = 3$ especifica la potencia de decaimiento del producto de fisión, $yt = 4$ especifica la potencia de decaimiento de los actínidos. Si es 10001-19999, la fuente es la variable de control cuyo número es esta cantidad menos 10000.

Para ejecutar el código de cinética RELAP5 / PARCS 3-D, el usuario debe ingresar la opción 88 en la tarjeta 1. Durante la inicialización de la estructura de calor, no se llama a PARCS, por lo tanto depende de RELAP5 suministrar las temperaturas iniciales de potencia y temperatura de la estructura. Dependiendo de cómo el usuario modele la temperatura inicial de la estructura de calor, el usuario puede necesitar ingresar una potencia inicial. Si el indicador de inicialización de estado estable W4 en la tarjeta 1CCCG000 es un 0, las temperaturas iniciales se introducen en las tarjetas 1CCCG401-G499, y no es necesario ingresar a una fuente de alimentación. Si el indicador de inicialización de estado estacionario W4 en la tarjeta 1CCCG000 es un 1, el código calcula las temperaturas iniciales de estado estable y el usuario debe ingresar una potencia inicial. La potencia inicial se puede ingresar usando cualquiera de los métodos discutidos en el párrafo anterior. Después del cálculo de la potencia inicial de RELAP5, PARCS suministrará la energía y se saltará el cálculo de la potencia RELAP5.

Es aceptable reiniciar un cálculo de código acoplado de cinética RELAP5 / PARCS 3-D desde un archivo de reinicio autónomo RELAP5 en el que el usuario puede usar cualquiera de los tipos de fuentes de calor. Sin embargo, en el caso inverso, no se permite reiniciar un cálculo autónomo RELAP5 a partir de un archivo de reinicio de código acoplado RELAP5 / PARCS.

- W2. Multiplicador de fuente interna. Los factores de pico axial se pueden ingresar aquí. Estos valores se multiplican por la potencia en el número de tabla general en Word 1 para obtener la potencia total generada en esta estructura de calor. Estos factores no son factores relativos.
- W3. Multiplicador de calentamiento del moderador directo para el volumen del límite izquierdo (ver Sección 3.3 del Volumen II).
- W4. Multiplicador de calentamiento del moderador directo para el volumen del límite derecho.
- W5. Número de estructura de calor.

A.2.11. Formato de 9 palabras para el Límite izquierdo adicional, 1CCCG801-G899

Estas tarjetas son necesarias siempre que el límite izquierdo comunique energía con el volumen de fluido de la mano izquierda, y Word 1 = 0 en la tarjeta 1CCCG800. Las tarjetas están en formato de expansión secuencial, nueve palabras por conjunto, que describen n_h estructuras de calor. La expansión secuencial solo se usaría cuando el valor crítico del flujo de calor no fuera importante, ya que la longitud de todas las estructuras de calor en la expansión sería la misma. Las palabras 2-8 se usan para la correlación CHF.

- W1. Diámetro hidráulico de transferencia de calor (es decir, diámetro equivalente calentado) (m, ft). Esto es $4 \left(\frac{\text{areade flujo}}{\text{perimetrocalefactor}} \right)$ y se recomienda que sea mayor o igual que el diámetro hidráulico del volumen desde $(\text{perimetrocalefactor}) \leq (\text{perimetromojado})$. Es posible introducir este diámetro para que sea menor que el diámetro hidráulico del volumen. Si Word 1 es igual a 0.0, se usa el diámetro hidráulico del volumen. Consulte la Sección 3.5 del Volumen II del manual para obtener más instrucciones.
- W2. Largo calentado hacia adelante (m, ft). La distancia es desde la entrada calentada al centro de esta losa. Esta cantidad se usará cuando la velocidad del volumen del líquido sea positiva o 0. Esto se usa para obtener el efecto de longitud de entrada hidráulica. Esto se usa solo para la correlación CHF. Debe ser ≥ 0 . Para ignorar el efecto de longitud, ingrese un número grande (es decir, $\geq 10,0$).
- W3. Largo calentado inverso (m, ft). La distancia es desde la salida calentada al centro de esta losa. Esta cantidad se usará cuando la velocidad del volumen del líquido sea negativa. Esto se usa para obtener el efecto de longitud de entrada hidráulica. Esto se usa solo para la correlación CHF. Debe ser ≤ 0 . Para ignorar el efecto de longitud, ingrese un número grande (es decir, $\geq 10,0$).
- W4. Longitud del espaciador de la rejilla hacia adelante (m, ft). La distancia es desde el centro de esta losa a la red más cercana u obstrucción aguas arriba. Esta cantidad se usará cuando la velocidad del volumen del líquido sea positiva o 0. Esto se usa para obtener la perturbación de la capa límite y el efecto de atomización de un espaciador de rejilla en haces de varillas. Esto se usa solo para la correlación CHF. Si la pérdida de K de la cuadrícula (Palabra 6) es 0, no se utiliza la palabra 4.
- W5. Longitud del espaciador de la rejilla inversa (m, ft). La distancia es desde el centro de la losa hasta la rejilla más cercana u obstrucción aguas abajo. Esta cantidad se usará cuando la velocidad del volumen del líquido sea negativa. Esto se usa para obtener la

perturbación de la capa límite y el efecto de atomización de un espacio de la red en haces de varillas. Esto se usa solo para la correlación CHF. Si la pérdida de K de la cuadrícula (Palabra 7) es 0, no se utiliza Word 5.

- W6. Coeficiente de pérdida de cuadrícula hacia adelante. Se usa para flujo hacia adelante en haces de varillas. Esta cantidad se usa cuando la velocidad del volumen del líquido es positiva o 0. Esto se usa solo para el cálculo de CHF.
- W7. Coeficiente de pérdida de cuadrícula inversa. Usado para flujo inverso en haces de varillas. Esta cantidad se usa cuando la velocidad del volumen del líquido es negativa. Esto se usa solo para la correlación CHF.
- W8. Factor de ebullición local. Ingrese 1.0 si no hay una fuente de poder en la estructura de calor o si la calidad de equilibrio local es negativa (es decir, el líquido está subenfriado y el vacío es 0). Este es el flujo de calor local / flujo de calor promedio desde el inicio de la ebullición. Si el perfil de potencia no es plano, una ejecución en estado estable puede ayudar a determinar este número. Este número debe ser mayor que 0.0.
- W9. Número de estructura de calor.

A.2.12. Formato de 9 palabras para el Límite derecho adicional, 1CCCG901-G999

Estas tarjetas son necesarias siempre que el límite correcto comunique energía con el volumen de fluido de la mano derecha, y Word 1 = 0 en la tarjeta 1CCCG900. Las tarjetas están en formato de expansión secuencial, nueve palabras por conjunto, que describen nh estructuras de calor. La expansión secuencial solo se usaría cuando el valor crítico del flujo de calor no fuera importante, ya que la longitud de todas las estructuras de calor en la expansión sería la misma. Las palabras 2-8 se usan para la correlación CHF.

Las palabras son las mismas que en la sección anterior.

Bibliografía

- [1] Centro Atómico Bariloche: Investigación y desarrollo en ciencia y tecnología. Proyecto ra-10. <https://www.cab.cnea.gov.ar/index.php/proyecto-ra-10/61-espanol/proyectos/ra-10/278-objetivos-y-metas>.
- [2] CNEA. Proyecto ra-10. <https://www.cnea.gov.ar/es/proyectos/ra-10/>.
- [3] Ciudad Universitaria Córdoba Argentina Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. El reactor nuclear ra-0. *https : //es.wikipedia.org/wiki/Archivo : Curva_de_bullicion.svg*.
- [4] CNEA. Reactor argentino ra-1. <https://www.cnea.gob.ar/es/tecnologia-nuclear/reactores-de-investigacion/introduccion/>.
- [5] Coordinación y Control – Sub gerencia Capital Intelectual Comisión Nacional de Energía Atómica; Domingo Quilici Gabinete – Comisión de Nacional de Energía Atómica; Santiago Harriague – Gerencia de Área de Seguridad Nuclear y Ambiente Comisión Nacional de Energía Atómica Federico Briozzo Instituto de Estudios sobre la Ciencia y la Tecnología – Universidad Nacional de Quilmes; María Mónica Sbaffoni Gerencia de Planificación. A 40 años de la inauguración del ra-3: anécdotas, historias y algunas enseñanzas, 2007. <http://www.lateandes.com/latex/wp-content/uploads/2016/08/RA3.pdf>.
- [6] CNEA. Reactor argentino ra-4. <https://www.cnea.gov.ar/es/tecnologia-nuclear/reactores-de-investigacion/ra-4/>.
- [7] Facultad de Ciencias Exactas; Ingeniería y Agrimensura; Universidad Nacional de Rosario. Reactor argentino ra-4: Reactor nuclear de investigación y docencia, jul 2011. <https://ra4unr.wordpress.com/>.
- [8] INVAP. Ra-6 de argentina. <http://www.invap.com.ar/es/area-nuclear-de-invap/proyectos/reactores-ra6-de-argentina.html>.
- [9] Centro Atómico Bariloche: Investigación y desarrollo en ciencia y tecnología. Reactor argentino ra-6. <https://www.cab.cnea.gov.ar/index.php/oferta-tecnologica/equipamiento/reactor-ra6>.

-
- [10] INVAP. Ra-8 de argentina. <http://www.invap.com.ar/es/area-nuclear-de-invap/proyectos/reactores-ra8-de-argentina.html>.
- [11] Nucleoelectrica Argentina S.A. Central nuclear atucha i. <http://www.nasa.com.ar/centrales-nucleares/atucha-1/>.
- [12] Nucleoelectrica Argentina S.A. Central nuclear atucha ii. <http://www.nasa.com.ar/centrales-nucleares/atucha-2/>.
- [13] Nucleoelectrica Argentina S.A. Central nuclear embalse. <http://www.nasa.com.ar/centrales-nucleares/embalse/>.
- [14] CNEA. Proyecto carem. <https://www.cnea.gov.ar/es/proyectos/carem/>.
- [15] L. Claramonte; R. Hilal. Modelo del loop del reactor ra-10 para simulaciones de transitorios e hipotéticos accidentes. Technical report, Gerencia de Reactores y Centrales Nucleares CAC-CNEA - Departamento de seguridad nuclear y termo hidráulica, -. Preparó: L. Claramonte; R. Hilal Revisó: S. Papadakis; I. Braida; P. Cantero Intervino calidad: M. Baiz Aprobó: H. Blaumann.
- [16] M.S. Lebold, Ken Maynard, Karl Reichard, M Trethewey, D Bieryla, Cliff Lissenden, and D Dobbins. Using torsional vibration analysis as a synergistic method for crack detection in rotating equipment. 6:3517 – 3527 Vol.6, 04 2004.
- [17] valmatic. Válvula de retención a clapeta con palanca y resorte, palanca y contra peso y/o amortiguador de aire lateral manual de operación, mantenimiento e instalación. <http://www.valmatic.com/pdfs/SWCV-OM1-2-Spanish.pdf>.
- [18] Wikipedia. Válvula antirretorno. https://es.wikipedia.org/wiki/VC3A1lvula_antirretorno.
- [19] I. Braida. Eventos iniciantes del loop para los estados operacionales de irradiación y espera caliente. Technical report, Gerencia de Reactores y Centrales Nucleares CAC-CNEA - Departamento de seguridad nuclear y termo hidráulica, 2016. Preparó: I. Braida Revisó: C. Garay ; R. Hilal; L. Vázquez; P. Cantero Intervino calidad: M. Baiz Aprobó:H. Blaumann.
- [20] Wikipedia. Curva de ebullicion - nukiyama. https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Curva_de_ebullicion.svg.
- [21] J. P. Holman. *Transferencia de calor*. Ceca, tenth edition, 1999.

-
- [22] Jianguo Yan, Qincheng Bi, Ge Zhu, Laizhong Cai, Qizheng Yuan, and Haicai Lv. Critical heat flux of highly subcooled water flow boiling in circular tubes with and without internal twisted tapes under high mass fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95:606 – 619, 2016.
- [23] L. Claramonte; R. Hilal. Modelo del loop del reactor ra-10 para simulaciones de transitorios e hipotéticos accidentes: Cálculo del estado estacionario. Technical report, Gerencia de Reactores y Centrales Nucleares CAC-CNEA - Departamento de seguridad nuclear y termo hidráulica, -. Preparó: L. Claramonte; R. Hilal Revisó: S. Papadakis; I. Braidá; P. Cantero Intervino calidad: M. Baiz Aprobó: H. Blaumann.
- [24] H. J. Macintire. *Refrigeration Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., first edition, 1940.
- [25] David P. De Witt Frank P. Incropera. *Transferencia de calor*. Prentice hall, fourth edition, 1999.
- [26] L. S. Tong y Joel Weisman. *Thermal Analysis of pressurized water reactors*. American Nuclear Society, third edition, may 1996.
- [27] Daverio Hernando J. Calculo termohidraulico del loop en operación normal con el codigo cobra iv-i. Technical report, Gerencia de Reactores y Centrales Nucleares CAC-CNEA - Departamento de seguridad nuclear y termo hidráulica, 2015. Preparó: Daverio Hernando J. Revisó: Vazquez Luis, Ottaviani Anahi Intervino calidad: Porro Martín Aprobó: Scolari Hugo.
- [28] The shape factor for dnb heat flux calculation in non-uniform heated channels. [https :
//ocw.mit.edu/courses/nuclear – engineering/22 – 313j – thermal – hydraulics –
in – power – technology – spring – 2007/readings/chf_shape.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-313j-thermal-hydraulics-in-power-technology-spring-2007/readings/chf_shape.pdf).