

***“DESARROLLO DE UN MODELO CON CÓDIGO TERMOHIDRAULICO
DEL CAREM 25”***

***CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES Y SU
CICLO DE COMBUSTIBLE***

Alumno: Leopoldo Mauricio Martín
Director: Marcos Agustín Delmastro



Leopoldo Martín



Mes y año: Diciembre del 2022

Índice

CAPÍTULO 1:	4
1.1 RESUMEN	4
1.2 OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 2: ASPECTOS TÉCNICOS DEL CAREM 25	4
2.1 INTRODUCCIÓN AL CAREM 25	4
2.2 GENERALIDADES TÉCNICAS DEL CAREM 25	5
2.3 PÉRDIDAS EN EL PRIMARIO	7
2.4 DISEÑO DEL SISTEMA PRIMARIO DE REFRIGERACIÓN	7
2.4.1 RECIPIENTE DE PRESIÓN	8
2.4.2 NÚCLEO	9
2.4.3 GENERADORES DE VAPOR	11
2.4.4 CONDICIONES DE DISEÑO DEL SISTEMA SECUNDARIO	12
CAPÍTULO 3: RELAP5/3.2	12
3.1 INTRODUCCIÓN AL RELAP5/3.2	12
3.2 ELABORACIÓN DE UN INPUTS Y BREVE EXPLICACIÓN DE LOS COMPONENTES	12
3.3 ANÁLISIS DE LOS OUTPUTS	14
4 MODELO TERMOHIDRÁULICO	14
4.1 SIMPLIFICACIONES EN MODELO TERMOHIDRÁULICO	14
4.1.1 COMPONENTE 100 (PLENUM INFERIOR)	14
4.1.2 COMPONENTE 110 (NÚCLEO)	15
4.1.3 COMPONENTE 115 (CHIMENEA)	16
4.1.4 COMPONENTE 130 (DOMO DE VAPOR)	16
4.1.5 COMPONENTE 150 (GENERADOR DE VAPOR LADO CARCASA)	17
4.1.6 COMPONENTE 160 (DOWNCOMER)	17
4.1.7 COMPONENTE 200 (SUMINISTRO DE AGUA AL SECUNDARIO)	18
4.1.8 COMPONENTE 201 (INLET AL GV LADO TUBO)	18
4.1.9 COMPONENTE 210 (GV LADO TUBO)	18
4.1.10 COMPONENTE 220 (DESCARGA DE VAPOR)	19
4.1.11 HEAT STRUCTURE 110 (NUCLEO)	19
4.1.12 HEAT STRUCTURE 150 (GV)	19
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRIMER CORRIDA	19
4.3 SEGUNDA CORRIDA	20
4.3.1 CONSIDERACIONES PARA LA SEGUNDA CORRIDA	20

4.3.2	RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SEGUNDA CORRIDA	21
4.4	CONSIDERACIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS EN LA TERCERA CORRIDA	21
4.5	CUARTA CORRIDA	22
4.5.1	CONSIDERACIONES PARA LA CUARTA CORRIDA	22
4.5.2	VALORES DE AJUSTE Y RESULTADOS DE LA CUARTA CORRIDA	23
4.6	ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE SUMINISTRO ELÉCTRICO	25
4.6.1	COMPONENTES 145 Y 142 (VÁLVULA DE ALIVIO Y CONTENCIÓN)	25
4.6.2	SIMULACIÓN DE LA PÉRDIDA DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO	25
4.6.3	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE PÉRDIDA DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO	25
5	CONCLUSIONES	27
6	BIBLIOGRAFIA	27
7	ANEXOS	29
	ANEXO 1: DIAGRAMA DEL RECIPIENTE DE PRESIÓN.	29
	ANEXO 2: NIVEL DE AGUA EN EL RPV ANTE PERDIDA DE REFRIGERANTE DEBIDO A ROTURAS DE DIFERENTES DIÁMETROS. ^[3]	30
	ANEXO 3: DIAGRAMA DEL MODELO TERMOHIDRÁULICO DE LA PRIMER CORRIDA.	31
	ANEXO 4: DIAGRAMA DEL MODELO TERMOHIDRÁULICO DE LA SEGUNDA CORRIDA.	32

Capítulo 1:

1.1 Resumen

El CAREM es un reactor nuclear modular de baja y media potencia. Con el avance del cambio climático y la necesidad de desarrollo productivo a nivel nacional, el proyecto CAREM fue designado de interés estratégico. A medida que el proyecto avanza, controles más rigurosos son requeridos para la verificación de la ingeniería y seguridad del reactor. El desarrollo de modelos termohidráulicos desempeña un papel fundamental en la tanto la comprobación de la ingeniería como en el análisis de los accidentes. En este trabajo se propone desarrollar un modelo termohidráulico en RELAP5 para el CAREM 25 con el objetivo de alcanzar un estado estacionario comparable a los valores de diseño.

CAREM is a small to medium modular nuclear reactor. With climate change advancing over the horizon and the national necessity to promote industrial development, CAREM was assigned as a project with strategic interest. As the project evolves, further and more meticulous checks are required to verify the engineering advancements and safety of the reactor. The aim of this paper is to construct a thermohydraulic model in RELAP5 for the nuclear reactor CAREM 25, with the objective of reaching a stationary state that follows the operation specifications.

1.2 Objetivos

Los objetivos del trabajo son:

- Recopilar información acerca de los sistemas termohidráulicos del CAREM 25.
- Dar una introducción acerca del código termohidráulico a utilizar y sus generalidades.
- Desarrollar un modelo termohidráulico del reactor y en caso de ser necesario, ajustar el modelo termohidráulico para alcanzar valores de diseño.

Capítulo 2: Aspectos técnicos del CAREM 25

2.1 Introducción al CAREM 25

Es necesario remarcar que el CAREM es un concepto innovativo de reactores nucleares que aún se encuentran en etapa de desarrollo. Tal reactor formara parte de una nueva flota de reactores a nivel mundial denominados **small modular reactors** (SMRs). Las principales generalidades de estos tipos de reactores son las siguientes^[9]:

- Una generación relativamente pequeña en comparación a las centrales nucleares convencionales.

- Diseños modulares para posibilitar la prefabricación de componentes y sistemas, y ser ensamblado rápidamente en el sitio de construcción.

Debido a estas particulares, estos reactores establecen un nuevo horizonte para la generación nucleoelectrónica. Su pequeño tamaño y modularidad permite la instalación de centrales en lugares aislados de la red eléctrica como poblados rurales, islas o industrias remotas ^[9].

Sus diseños son inherentemente seguros al incorporar sistemas de seguridad pasivos como auto presurización, sistemas de refrigeración pasiva que actúan por convección natural entre otros. En caso de un accidente, estos reactores son capaces de alcanzar un estado seguro sin intervención humana, disminuyendo el riesgo de daño del núcleo y liberación de radioisótopos a la atmósfera ^{[8][9]}.

Desarrollado por el ex Departamento de Reactores nucleares de CNEA en la década de los 80s y presentado públicamente en el 1984, el reactor CAREM es uno de los primeros en su diseño. El diseño y desarrollo del CAREM es completamente nacional, convirtiéndolo así en el primer reactor argentino. Actualmente el proyecto empezó su obra civil en el año 2014 y lo posiciono como el primer SMR del mundo en estar en etapa de construcción ^[10].



Imagen n° 1. Central nuclear CAREM en construcción. Obtenida en:
<https://www.argentina.gob.ar/cnea/carem/la-construccion-del-carem-en-fotos>

2.2 Generalidades técnicas del CAREM 25

El diseño del CAREM posee una gran serie de particularidades que divergen sobre otros modelos de reactores nucleares convencionales. Su pequeño tamaño se debe a la innovativa decisión de integrar componentes y sistemas al recipiente del reactor e inclusive remover el sistema de bombas, reduciendo aún más el volumen ocupado por el reactor. Principalmente, las características de diseño que lo hacen único frente a reactores convencionales son ^[1]:

- Un sistema integrado de auto presurización en el primario.

- Refrigeración por medio de convección natural.
- Generadores de vapor integrados al recipiente de presión.
- Sistemas pasivos de refrigeración de emergencia y apagado del reactor.
- Mecanismos de control de reactividad hidráulicos integrados al recipiente de presión.

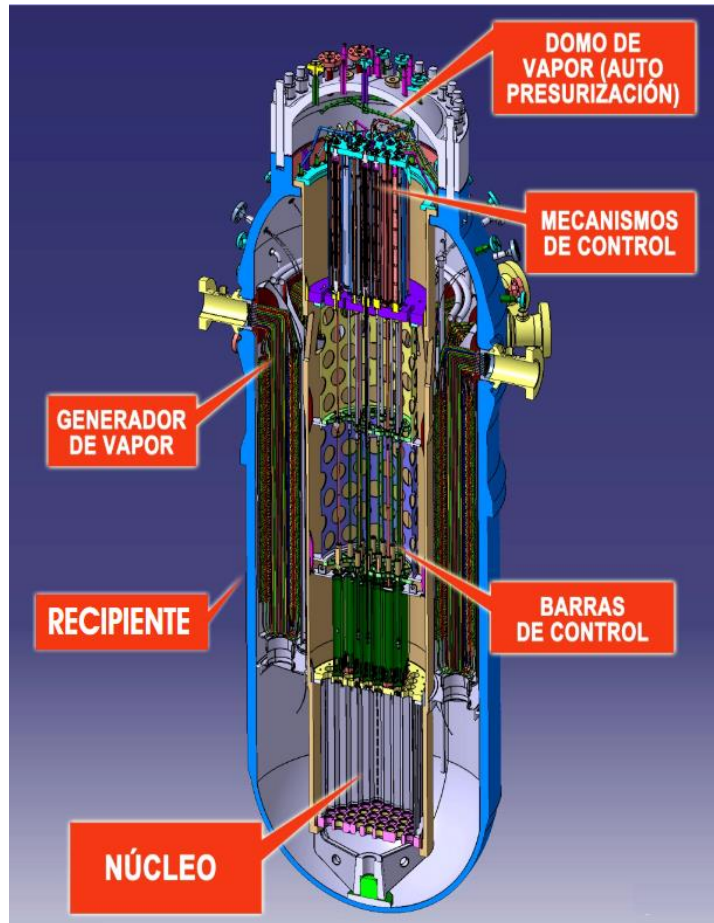


Imagen nº 2. CAREM 25 y sus sistemas integrados. Obtenido de:
<https://www.cnea.gob.ar/es/wp-content/uploads/files/02Boletin25Carem.pdf>

Gracias a la integración de sistemas, el volumen de caños disminuye significativamente, bajando ciertos riesgos al punto que son técnicamente improbables de que pasen. Las ventajas concebidas por el diseño abarcan varios puntos, pero desde el aspecto técnico se destacan ^[1]:

- Eliminación de la posibilidad de producir un gran Loss of Coolant Accident (LOCA) debido a la ausencia de cañerías que salen del recipiente de presión en el sistema primario. Para que un LOCA suceda, es necesario que falle catastróficamente el recipiente de presión, lo cual es improbable.
- Una gran inercia térmica generada por la convección natural y auto presurización del sistema. Esto presenta una ventaja frente a condiciones de accidentes ya que los transitorios tendrán periodos largos, aumentando el periodo de gracia.
- Costos de inversión y mantenimiento menores debido a que no es necesario implementar una bomba en el primario. Adicionalmente, elimina las probabilidades que tiene el componente en fallar y poner al sistema en una condición no deseada.

- Menor dosis en la contención al tener un menor volumen de primario, el cual se encuentra concentrada solamente en el recipiente de presión. Por lo tanto, se necesita menos blindaje y se reducen costos.

A diferencia de otros reactores de potencia en Argentina, el CAREM 25 operara con agua liviana y combustible de distinto enriquecimiento. Una particularidad que varía de los PHWR existentes en el país es que el CAREM operará a temperaturas y presiones más elevadas, llegando a generar una fracción de vapor en el núcleo con el fin de mantener el sistema presurizado. Las condiciones de operación del CAREM 25 son las siguientes:

Parámetro	Valor
Temperaturas del refrigerante	326°C – 284°C ^[1]
Presión del primario	12,25 MPa ^[1]

Tabla nº 1. Condiciones de operación del CAREM 25

2.3 Pérdidas en el primario

Una de las varias complejidades que acarrea el diseño y funcionamiento del CAREM proviene en la determinación de las pérdidas de cargas del primario. Debido a que el enfoque del reactor recae en la capacidad de circular refrigerante mediante la convección natural. El estudio de las pérdidas de carga es una parte fundamental para determinar el posible caudal másico del primario y consecuentemente, cuanto calor puede ser extraído del mismo.

La determinación de las pérdidas de cargas del CAREM 25 se realizó en varias etapas a lo largo de los años para consolidar la ingeniería del proyecto. Gran parte de las determinaciones fueron obtenidas de simulaciones de fluidos. Por otro lado, se realizaron pruebas termohidráulicas en el Circuito de Alta Presión de Convección Natural para poder verificar aún más la ingeniería del proyecto. De todas estas experiencias, se pudieron obtener los siguientes datos:

Pérdida de carga	Valor
Totales	3665 Pa ^[8]
Núcleo	1400 Pa ^[8]
GV	2000 Pa ^[8]

Tabla nº 2. Perdidas de cargas en diferentes zonas del primario

2.4 Diseño del sistema primario de refrigeración

El corazón de todo central nuclear se ve en el sistema primario de refrigeración, el cual dicta como los otros sistemas deberán ser diseñados. Las partes del sistema primario de refrigeración en conjunto a aquellos componentes que dictan el diseño de este son los siguientes:

- Recipiente de presión
- Núcleo
- Generador de vapor
- Condiciones del sistema secundario de remoción de calor

2.4.1 Recipiente de presión

El recipiente de presión o reactor pressure vessel (RPV) del CAREM 25 fue diseñado con el fin de incorporar todos los componentes del sistema primario refrigeración en conjunto al núcleo en un solo volumen. Para mantener el sistema auto presurizado, se incorporó un domo de vapor en la parte superior del RPV en donde existe un equilibrio dinámico entre vapor saturado y agua.

Dentro del RPV, se manifiestan dos flujos con sentidos contrarios debido a la transferencia de calor en zonas radiales diferentes y una consecuente variación de densidad por parte del refrigerante. Por un lado, existe un flujo ascendente en el barrel del núcleo y chimenea del reactor, la cual conecta el plenum inferior con el domo de vapor. Este flujo ascendente es ocasionado por el calentamiento del refrigerante al pasar a través del núcleo.

Por otro lado, existe un flujo descendente se encuentra entre el diámetro externo del barrel y chimenea del núcleo; y el diámetro interno del recipiente de presión. Para que se dé el flujo descendente, es necesario retirar calor del refrigerante y tal proceso lo realizan los 12 generadores de vapor que se encuentran rodeando la chimenea del núcleo.

En síntesis, el recorrido del refrigerante es:

Plenum inferior → **Núcleo** (Fuente de calor) → Chimenea → Domo de vapor (Equilibrio entre vapor saturado y agua) → **Generador de Vapor** (Fuente fría) → Downcomer → Plenum inferior

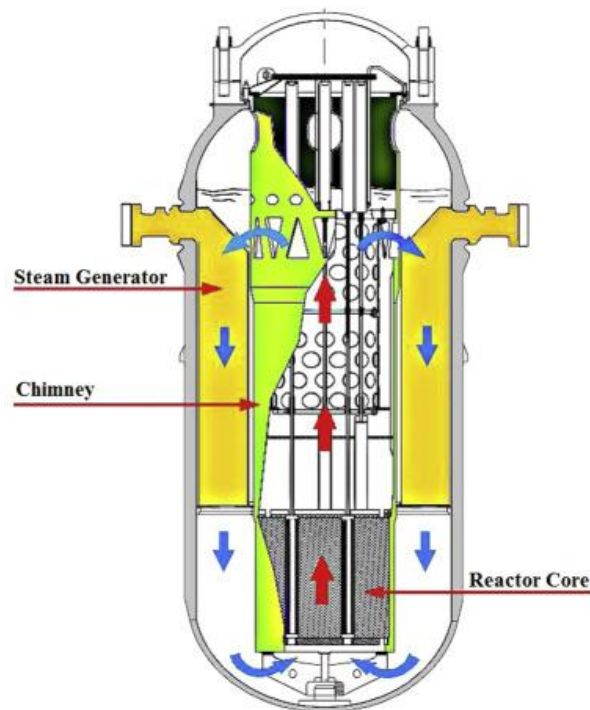


Imagen nº 3. Diagrama de circulación del refrigerante. Obtenido de: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S014919701730121X-gr1.jpg>

Observando el anexo 1, se pueden observar las dimensiones de los diferentes componentes del recipiente de presión. Por otro lado, para encontrar la altura de la columna de agua en el reactor, se optó por utilizar el anexo 2 en donde se realizó un análisis del nivel del agua frente

a diferentes situaciones de pérdidas de caudal. En tal gráfico, lo que se encontró fue que el nivel de agua siempre empieza a una altura determinada, la cual se asumió que es la de diseño. Toda esta información fue recopilada en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor
Longitud total	11 m ^[2]
Diámetro interno	3,16 m ^[2]
Altura chimenea	4,6 m ^[1]
Altura de los GV	5,4 m ^[3]
Altura del tope del núcleo	1,4 m ^[3]
Altura normal del nivel de agua (Desde el inlet del núcleo)	Aproximadamente 6,4 m ^[3]

Tabla nº 4. Dimensiones del recipiente de presión

2.4.2 Núcleo

El núcleo del reactor CAREM 25 está compuesto por 61 elementos combustibles con sección transversal hexagonal, los cuales poseen 127 tubos de 9 mm de diámetro externo, 108 de los cuales son barras combustibles, 18 tubos guías para barras de absorción y 1 tubo guía para instrumentación. No existen canales combustibles entre cada elemento combustibles, lo cual permite el flujo cruzado de refrigerante. ^[1, 4]

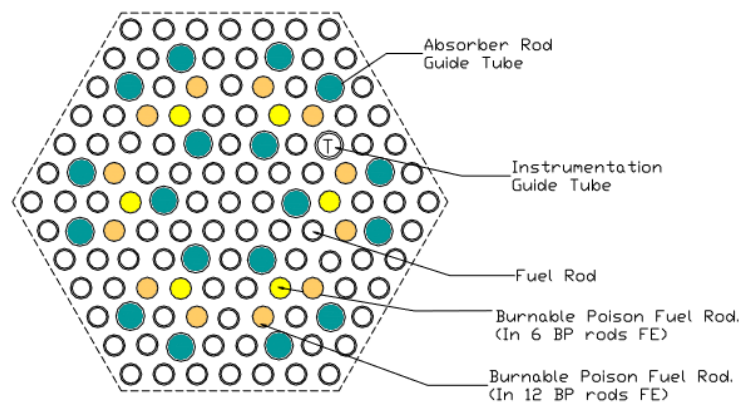


Imagen nº 4. Disposición de barras dentro del elemento combustible. Obtenido de: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/32/068/32068427.pdf>

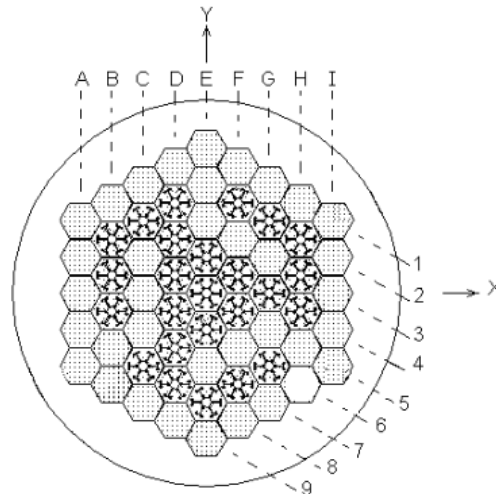


Imagen nº 5. Disposición de elementos combustibles en el núcleo. Obtenido de:
<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/32/068/32068427.pdf>

El enriquecimiento del uranio varía según la posición de los elementos combustibles y se encuentra en un rango de 1,8% a 3,1%. El propósito de poseer un núcleo con diferentes enriquecimientos y venenos neutrónicos es de establecer un quemado uniforme con el fin de mejorar y facilitar el ciclo de combustible. [1, 3]

Las dimensiones de las barras y elementos combustibles son los siguientes:

Parámetro	Valor
Sección de paso triangular	13,8 mm [4]
Longitud activa del núcleo	1400 mm [4]
Distancia entre el centro de los EC	160 mm [4]
Diámetro equivalente del núcleo	1312 mm [4]
Longitud total del EC	1800 mm [5]

Tabla nº 5. Dimensiones de las barras y los EC

La composición de los pellets combustibles es de dióxido de uranio (UO_2) y en aquellos elementos combustibles con venenos quemables son de una combinación de dióxido de uranio y trióxido de gadolinio (Gd_2O_3). Luego, entre los pellets y el cladding se tiene un gap de helio (He). Por último, se tiene el cladding compuesto por circalloy 4 (Zry-4) [5].

Los radios de los diferentes componentes en las barras combustibles están conformados de la siguiente forma:

Parámetro	Valor
Diámetro exterior	9 mm [5]
Espesor del cladding	0,625 mm [5]
Diámetro pellet	7,6 mm [5]

Tabla nº 6. Radios de los componentes de las barras

La potencia térmica total generada por el núcleo es de 100MW(th), los cuales en términos de potencial lineal promedio son 108,4 W/cm [4].

2.4.3 Generadores de vapor

Los generadores de vapor (GV) son aquellos componentes que permite la transferencia de calor del sistema primario de refrigeración al sistema secundario. En el reactor CAREM 25, el refrigerante del circuito primario circula por el lado carcasa mientras que el vapor es generado dentro de los tubos.

Los GV consisten en un intercambiador de calor helicoidal de paso único. Hay 12 módulos en total, ubicados en la sección anular del reactor entre la chimenea y la pared del RPV. Cada módulo está compuesto por 52 tubos los cuales salen del distribuidor en la parte superior y luego forman un manojo en disposición circular. Los mismos descenden por una carcasa interior (tubo de bajada de alimentación) hasta llegar a la parte inferior del GV en donde se separan y suben en 6 camisas de disposición helicoidal. Al fin de los tubos helicoidales, los mismos se conectan a un plenum antes de egresar del GV.

Parámetros:	Valor
Altura activa del GV	3,15 m ^[7]
Material de los tubos	Inconel 690 ^[6]
Diámetro externo de los tubos	15,88 mm ^[6]
Espesor de los tubos	1,83 mm ^[6]
Paso radial	30,05 mm ^[6]
Paso axial	18 mm ^[6]
Área de transferencia	68,3 m ² ^[8]
Área de pasaje	0,11 m ² ^[8]
Diámetro externo de la carcasa	0,614 m ^[8]

Tabla nº 7. Características de los GV

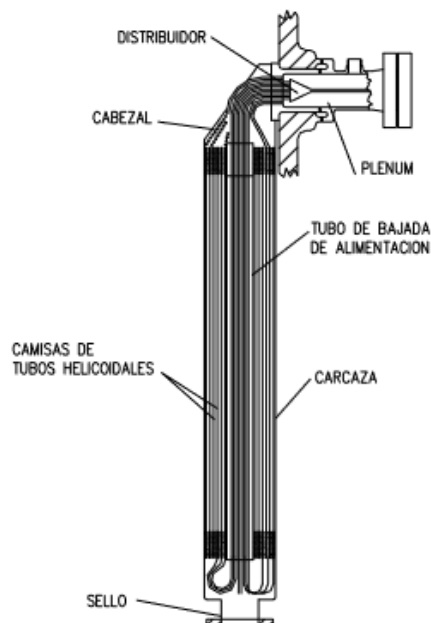


Imagen nº 6. Generador de vapor. Obtenido de:

<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/32/068/32068427.pdf>

En síntesis, el flujo de refrigerante en el sistema secundario es el siguiente:

Distribuidor → Tubo de bajada de alimentación → Camisa de tubos helicoidales → Cabezal → Plenum

2.4.4 Condiciones de diseño del sistema secundario

Si bien el diseño del sistema secundario escapa los alcances de este trabajo, es necesario mencionar las condiciones de diseño. Para esto, se debió recopilar información vinculada al flujo másico, presión y temperaturas del secundario con el fin de diseñar un sistema representativo de la extracción de calor del CAREM.

Parámetro	Valor
Temperatura del secundario	290°C – 200 °C [6]
Presión del secundario	4,7 MPa [3]
Caudal másico	175,32 t/hr [3]

Tabla nº 8. Condiciones de diseño del sistema secundario.

Capítulo 3: RELAP5/3.2

3.1 Introducción al RELAP5/3.2

RELAP es código termohidráulico originalmente desarrollado por el Laboratorio Nacional de Idaho (INL) para la comisión nuclear regulatoria de los E.E.U.U. (NRC). El código tenía como objetivo el modelado de accidentes y estados transitorios en reactores de agua liviana. A medida que el programa evoluciono, se permitió la modelación de diferentes sistemas termohidráulicos ya sean nucleares o no, y con diferentes tipos fluidos [11].

Es un código de tipo mejor estimación (Best Estimate). El mismo consiste en un modelo termohidráulico que utiliza modelos de dos fases en no equilibrio hidrodinámico unidimensional, que resuelve las ecuaciones de balance de masa, momento y balance de energía numéricamente a partir de un modelo parcialmente implícito, con la capacidad de acoplar un modelo neutrónico de cinética puntal.

3.2 Elaboración de un inputs y breve explicación de los componentes

La elaboración de los inputs de este trabajo pudo desarrollarse gracias al RELAP/SCDAPSIM Input Manual en el cual se da un pantallazo acerca de la utilización de diferentes tarjetas para el desarrollo del código termohidráulico. Como se mencionó previamente, el RELAP utiliza tarjetas para la confección del modelo. Estas mismas están compuestas por 96 caracteres, de los cuales solo 80 pueden ser utilizados. Existen varios tipos de tarjetas: title cards, comment cards, data cards etc., pero a modo de ejemplo, se utilizará una data card.

Las datas card pueden contener los siguientes tipos de variables: integer (número entero), real (floating point) o alfanumérico. El primer espacio en una tarjeta está compuesto por un integer y será el cual identificará la tarjeta, que datos ingresar y su función.

```
*crdno      name      type
2110000    GVsout     sngljun
```

Imagen nº 7. Ejemplo de una tarjeta.

Cómo se puede ver en la imagen nº 7, la primer línea es tomada como un comentario debido a que inicia con un *. Todo aquello que sea comentario no será incluido en el cálculo y simplemente nos ayuda como referencia a la hora de confeccionar el código.

Los primeros números nos indican el tipo de tarjeta. Esta tarjeta pertenece a la clasificación CCCXXNN, en donde el CCC identifica el componente, XX tipo de tarjeta y NN el número de tarjeta dentro del tipo de tarjeta.

La segunda variable, la cual es alfanumérica, nos identifica el nombre del componente. El nombre es completamente arbitrario y no debe de exceder de los 8 caracteres.

Por último, la tercer variable nos estipula el tipo de componente. Si se consulta en manual de input, se podrá ver que existe un número limitado y específico de los tipos de componentes descriptos en variables alfanuméricas.

Una vez terminado de definir esta tarjeta, será necesario chequear si el componente necesitara tarjetas adicionales para ser definido en su totalidad. En este caso, es necesario adicionar una tarjeta de tipo CCC0101 para aclarar las conexiones entre componentes debido a que estamos modelando una unión y luego otra tarjeta de CCC0201 para establecer las condiciones iniciales de la unión. Todo esto nos termina confeccionando el componente de la siguiente forma:

```
*-----
*               component 211
* Outlet al GV lado tubo
*crdno      name      type
2110000    GVsout     sngljun
*crdno      from      to      area      floss      rloss      flag
2110101    210010000  220000000  0        0          0        000
*crdno      ctl       flowf     flowg     velj
2110201    1         48.7      0.0      0
*-----
```

Imagen nº 8. Ejemplo de una tarjeta.

Pueden existir tarjetas opcionales a las cuales se puede recurrir para ser más específicos en cuanto a perdidas de cargas, cambios de volúmenes, entre otras características.

3.3 Análisis de los outputs

Para llevar adelante el análisis de los outputs, el programa tiene un par de tarjetas útiles. Las tarjetas encargadas de obtener los datos son conocidas como Minor Edit Requests. Por defecto, el código solicita una serie de datos durante el cálculo, los cuales no requieren un Minor Edit Request para ser obtenidos. Adicionalmente, existen tarjetas conocidas como Plot Requests, las cuales tienen la función de graficar datos de un Minor Edit Request a lo largo del tiempo en un componente especificado.

Si bien, los Minor Edits Requests son datos que se obtienen de la corrida del código, es necesario usar un código tipo STRIP para poder leer los datos. Esto es debido a que los output del RELAP se encuentra en archivos difíciles de leer sin la ayuda de un programa adicional. Los STRIPs nos ayudan a recopilar la información deseada y presentarlas en un archivo de texto de manera organizada y legible.

4 Modelo termohidráulico

4.1 Simplificaciones en modelo termohidráulico

Debido a que el CAREM 25 es un proyecto en desarrollo y con interés comercial, existen varios datos los cuales no pudieron ser obtenidos para el desarrollo del modelo. Además, tanto por los plazos de tiempo y limitaciones del programa, se debió llevar a cabo una serie de simplificaciones a la hora de confeccionar el modelo.

A continuación, se dará un breve pantallazo de los componentes más importantes del sistema en conjunto a las simplificaciones que se debieron tomar:

4.1.1 Componente 100 (Plenum inferior)

Para modelar el pleno inferior, se optó por modelar un volumen cilíndrico. Para esto, se utilizó un componente tipo single volumen.

Dado a que no se tenían datos del plenum inferior, mediante el anexo 1, se asumió que el plenum es una semiesfera de 1 m de radio:

$$Volumen = \frac{\frac{4}{3}\pi * (1\text{ m})^3}{2} = \frac{2}{3}\pi\text{ m}^3 = 2,0944\text{ m}^3$$

Como se especificó previamente, se toma un cilindro de radio de un metro el cual posee un volumen de 2,0944 m³. Para poder modelarlo de manera cilíndrica, se tomó el mismo volumen y se asumió un diámetro de 1 metro para obtener la altura:

$$Volumen\ cilindro = Altura * \pi * (1\text{ m})^2 \rightarrow Altura = \frac{\frac{2}{3}\pi\text{ m}^3}{\pi} = \frac{2}{3}\text{ m}^3 = 0,6667\text{ m}^3$$

Para encontrar la presión en el plenum inferior, utilizamos la siguiente ecuación:

$$P_1 + 0,5 * \rho * u_1^2 + \rho * g * z_1 = P_2 + 0,5 * \rho * u_2^2 + \rho * g * z_2$$

Debido a condiciones estáticas:

$$P_1 = P_2 + \rho * g * z_2$$

Si bien el agua experimenta diferentes densidades a lo largo del RPV, no es necesario llegar a una aproximación fina ya que no afectara el estado estacionario del mismo. Las presiones en el RPV rápidamente se autorregularán hasta alcanzar equilibrio.

$$\rho(284^\circ C) = 752,2 \frac{kg}{m^3}$$

$z_2 = 6,4 m + 0,5 m = 6,9 m$ (Altura promedio del plenum más altura de la columna de agua referenciada al núcleo. La altura promedio nos dará la presión promedio en el volumen de agua.)

$$P_1 = 12,24 * 10^6 Pa + 752,2 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 6,9 m = 12,29 MPa$$

4.1.2 Componente 110 (Núcleo)

En la simulación del núcleo, se eligió un pipe como componente ya que existen cambios de fase a lo largo del núcleo y el tipo de flujo cambiara a medida que avanza caudal. Si solamente se tuviera un solo volumen, gran parte del análisis a lo largo del núcleo se vería opacado por un promedio. Por lo tanto, se decidió modelar en forma de pipe para agregar una serie de volúmenes axiales que nos permiten realizar un análisis más exhaustivo del núcleo.

Para obtener el área de circulación de fluido se utilizó diferencia entre el área total del núcleo y el área ocupada por las diferentes barras:

$$Area\ de\ flujo = \pi * \left(\frac{1,312\ m}{2}\right)^2 - 61 * 127 * \pi * \left(\frac{0,009\ m}{2}\right)^2 = 0,859\ m^2$$

La primer área es obtenida con el diámetro equivalente del núcleo. La segunda área es obtenida con la cantidad de elementos combustibles, cantidad de barras por cada EC y el diámetro de las barras. No se tuvo en los separadores u otros componentes estructurales del núcleo.

Para el diámetro hidráulico se utilizó la siguiente formula teniendo en cuenta las simplificaciones previamente dichas:

$$Diametro\ hidraulico = 4 * \frac{Area\ de\ flujo}{Perimetro\ mojado} = 4 * \frac{0,859\ m^2}{\pi * 1,312\ m + 61 * 127 * \pi * 0,009\ m} = 0,022886\ m$$

Para establecer las condiciones iniciales del volumen, se toma la temperatura promedio entre entrada y salida del núcleo, la cual es 305 °C y se las asume para los 14 volúmenes del pipe. Luego cuando transcurre el tiempo, el perfil de temperaturas evolucionara hasta llegar al estado estacionario.

De la misma manera que se tomó la presión promedio en el componente 100, la presión en el pipe se toma en la mitad del núcleo:

$$P_1 = 12,24 * 10^6 Pa + 752,2 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * \left(7,4 - \left(1 + \frac{1,4}{2} \right) \right) m = 12,28 MPa$$

4.1.3 Componente 115 (Chimenea)

Para modelar la chimenea se asume un pipe de diámetro igual al diámetro equivalente del núcleo. De manera similar al núcleo, en la chimenea existen cambios de regímenes de flujo, por lo que es importante discretizarla en varios volúmenes, en este caso se usaron 44 volúmenes de 10 cm de altura. La altura de la chimenea se la obtuvo del anexo 1 pero se eligió tomar 4,4 m, ya que ya que los ultimo 20 cm con conexión hacia el GV serán incluidos en el domo de vapor.

$$Area\ de\ flujo = \pi * \left(\frac{1,312\ m}{2} \right)^2 = 1,352\ m^2$$

La presión en el pipe se toma en la mitad de la altura de la chimenea para promediar la presión total en el volumen:

$$P_1 = 12,24 * 10^6 Pa + 752,2 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * \left(7,4 - \left(1 + 1,4 + \frac{4,4}{2} \right) \right) m = 12,26 MPa$$

La temperatura en la chimenea es la temperatura de salida del núcleo.

4.1.4 Componente 130 (Domo de vapor)

Para lleva a cabo la simulación de domo de vapor, se utilizó un pipe de 4 volúmenes con una altura total de 3,06 m (0,765 m de altura cada volumen). El volumen inferior se conecta tanto a los generadores de vapor como a la chimenea. Se eligió que el domo de vapor empiece a la salida del componente de la chimenea en donde el área cambia drásticamente al diámetro interior del recipiente de presión. El área será representada por el diámetro interno del núcleo:

$$Area\ de\ flujo = \pi * \left(\frac{3,16\ m}{2} \right)^2 = 7,843\ m^2$$

Esta área representara 3 volúmenes del núcleo. Luego el área del volumen superior será equivalente al de la chimenea para simular la semiesfera que se encontraría en el tope del reactor.

$$Area\ de\ flujo = \pi * \left(\frac{1,312\ m}{2} \right)^2 = 1,352\ m^2$$

Para aproximar las condiciones iniciales a las del estacionario, se procede asumir que el primer volumen del domo de vapor está compuesto por agua saturada mientras que los demás volúmenes son de vapor saturado:

$$Altura\ de\ columna\ de\ agua = 1\ m + 1,4\ m + 4,4\ m + 0,765\ m = 7,565\ m$$

Como se puede ver, la altura de la columna de agua es lo suficientemente cerca de los 7,5 m que se acordó previamente en los cálculos de presión.

4.1.5 Componente 150 (Generador de vapor lado carcasa)

Debido a las complejidades vinculadas al generador de vapor se tomaron las siguientes simplificaciones. El flujo entre el domo de vapor y el plenum superior solamente se realiza por los GV, pasando entre la carcasa externa e interna por la sección anular. Se tomó un área de pasaje promedio (en la longitud activa del GV) que se obtuvo de la tabla nº 7, omitiendo cambios entre áreas de pasajes debido a la complejidad del modelado y falta de datos.

Para encontrar el diámetro de la carcasa interior del GV, se asumió que es aproximadamente un tercio del diámetro de la carcasa exterior del GV (0,205 m).

$$\begin{aligned} \text{Diametro hidraulico} &= 4 * \frac{\text{Volumen}}{\text{Area mojada}} \\ &= 4 * \frac{\left(3,15 \text{ m} * \pi * \left(\frac{0,614}{2} \text{ m} \right)^2 - 52 * 26 \text{ m} * \pi * \left(\frac{0,01588}{2} \text{ m} \right)^2 - 3,15 \text{ m} * \pi * \left(\frac{0,205}{2} \text{ m} \right)^2 \right)}{3,15 \text{ m} * \pi * 0,614 \text{ m} + 3,15 \text{ m} * \pi * 0,205 \text{ m} + 68,3 \text{ m}^2} \\ &= 0,0294 \text{ m} \end{aligned}$$

La presión elegida en el volumen es la presión promedio en el mismo:

$$P_1 = 12,24 * 10^6 \text{ Pa} + 752,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \left(7,4 - \frac{3,15}{2} \right) \text{ m} = 12,28 \text{ MPa}$$

La temperatura tomada fue la misma que en el núcleo, ya que es un promedio entre salida y entrada del refrigerante.

4.1.6 Componente 160 (Downcomer)

Se optó por escoger un single volumen para el downcomer que se extiende desde donde termina la longitud activa del GV hasta llegar al mismo nivel en donde empieza el núcleo.

Debido a que es una sección anular entre la pared de la chimenea y diámetro exterior, el área de flujo es:

$$\text{Area de flujo} = \pi * \left(\left(\frac{3,16}{2} \text{ m} \right)^2 - \left(\frac{1,312}{2} \text{ m} \right)^2 \right) = 6,491 \text{ m}^2$$

Para la presión, se optó por tomar el promedio de esta en su longitud:

$$P_1 = 12,24 * 10^6 \text{ Pa} + 752,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \left(7,4 - 3,15 - \frac{2,65}{2} \right) \text{ m} = 12,28 \text{ MPa}$$

4.1.7 Componente 200 (Suministro de agua al secundario)

Debido a que el foco de interés de este trabajo está en el sistema primario, se realizaron las siguientes simplificaciones para el secundario:

Se lo utiliza como un volumen infinito representado por un tipo de componente llamado time dependent volumen. El mismo suministrara de agua a los tubos del GV a una temperatura de 200 °C y presión de 4,7 MPa. El objetivo es simplemente tener un flujo de agua representativo del sistema secundario del CAREM 25 para remover calor del primario.

4.1.8 Componente 201 (Inlet al GV lado tubo)

Para la simulación del inlet, se utilizará un time dependent junction en el cual se fija un caudal másico de agua igual al caudal másico de vapor que ingresa a las turbinas. Este componente forzara que el caudal de agua se mantenga a ese valor, imitando el funcionamiento de una bomba.

4.1.9 Componente 210 (GV lado tubo)

De la misma forma que se planteó el GV lado carcasa, se plantea por el lado tubo. Se asume la misma longitud para luego vincularla al heat structure.

$$Area\ de\ flujo = 12 * 52 * \pi * \left(\frac{0,01222}{2} m \right)^2 = 0,073184 m^2$$

Para poder vincular el componente 210 con el 150 (lado carcasa) es necesario que ambos tengan la misma altura. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta la longitud total de los caños para que el volumen de agua y consecuentemente, la masa a la cual se va a transferir calor sea equivalente a la que se encuentra dentro de los tubos en la zona activa. Para encontrar la longitud activa se utilizó la siguiente formula:

$$Area\ de\ transferencia = 52 * h * \pi * 0,01588 m = 68,3 m^2$$

$$h = \frac{68,3 m^2}{52 * \pi * 0,01588 m} \approx 26 m$$

Sabiendo que la longitud activa de los tubos es de aproximadamente 26 m y con una elevación de 3,15 m, se procede a obtener el ángulo de inclinación necesario para la modelización del componente.

$$\text{sen}(\theta) = \frac{3,15 m}{26 m} \rightarrow \theta = \text{arc sen} \left(\frac{3,15}{26} \right) = 6,9587^\circ$$

No es necesario modelar el tubo de bajada de alimentación ya que el mismo no está incluido en la longitud activa del GV y lo único que se busca con el modelado del sistema secundario es de modelar la fuente fría.

4.1.10 Componente 220 (Descarga de vapor)

Para la descarga de vapor, se utilizó un time dependent volumen a una temperatura de 290 °C y presión de 4,7 MPa.

4.1.11 Heat structure 110 (Núcleo)

Para simular la generación de calor en el núcleo, es necesario vincular un heat structure al componente correspondiente que representa el núcleo (Componente 110). En este se define la estructura encargada de generar calor, sus propiedades de transferencia de calor y temperaturas iniciales.

Para la creación del mesh, el cual se encarga de definir la geometría espacial y componentes de la estructura, se utilizó los siguientes datos:

- Los primeros 5 intervalos representaran la pastilla y tendrá límite en el radio de la misma el cual es 3,8 mm. Las propiedades térmicas de la pastillas se la asociaron al modelo
- El siguiente intervalo, representara el gap:
$$\text{Radio exterior del gap} = \frac{9}{2} \text{ mm} - 0,625 \text{ mm} = 3,875 \text{ mm}$$
- Por último, los 3 intervalos finales tendrán las coordenadas de 4,5 mm, representado el radio exterior de la barra.

La temperatura inicial de la estructura de calor será la misma del refrigerante en el núcleo al iniciar la simulación y la potencia se mantendrá en 100 MW(th) de manera constante.

Todas las propiedades de las estructuras de calor fueron obtenidas de un modelo simple de un reactor PWR en el cual se utiliza componentes semejantes a los del CAREM 25.

4.1.12 Heat structure 150 (GV)

En la modelación del intercambiador de calor, se necesitará vincular los componentes 150 y 210, lado carcasa del GV y lado tubo del GV respectivamente. A diferencia del caso anterior, se debió definir un límite izquierdo debido a que la transferencia de calor solamente se realiza entre los radios interiores y exteriores del caño. Para esto, el límite izquierdo es de 0,00611 m lo cual es el radio interior de los tubos.

En la discretización radial, se tomaron 7 intervalos debido a que se definieron 8 mesh. Estos se extenderán hasta el radio externo del tubo del GV, lo cual nos dan 0,00749 m.

4.2 Resultados obtenidos en la primer corrida

Luego de confeccionar el modelo, se puede ver en el anexo 3 como quedó la disposición final de los componentes del reactor.

En la primer corrida, ciertos parámetros termohidráulicos divergen de los parámetros impuestos por diseño, esto es esperado debido a las simplificaciones tomadas para generar el código termohidráulico. Sin embargo, esta información nos es útil a la hora de tener que ajustar el modelo para poder aproximarlos a la realidad.

Parámetros	Valor
Temperatura núcleo	300,32 °C - 314,14 °C
Presión en el volumen 4 del domo de vapor	10,95 MPa
Flujo másico	1048,61 kg/s
Nivel de agua	7,674 m
Pérdidas de carga núcleo	989,58 Pa
Pérdidas de carga GV	2254,94 Pa

Tabla nº 9. Resultados de la primer corrida.

Principalmente, una de las causas de porque el modelo diverge de los parámetros de diseño es debido al alto caudal másico que se encuentra circulando en el primario y la disminución de la presión. Por lo tanto, habiendo encontrado aquellos parámetros que se desvían de los valores de diseño se plantea lo siguiente:

- La temperatura de entrada y salida del núcleo se ven vinculada a un sinnúmero de variables las cuales están vinculadas de manera compleja entre sí. Para solucionar la diferencia de temperatura entre el modelo y los parámetros de diseño será necesario corregir aquellas otras variables que pueden ser manipuladas como la pérdida de carga.
- La presión del primario cae significativamente de su valor de diseño y el nivel de agua disminuye levemente. Es importante remarcar que, a esa presión, el agua se encuentra cerca de la temperatura de saturación, lo cual es no deseado.
- A pesar de que las pérdidas de cargas de los principales componentes del primario se encuentran relativamente cerca de sus valores de diseño, el flujo másico excede los valores esperados por más del doble.

4.3 Segunda corrida

4.3.1 Consideraciones para la segunda corrida

En la segunda corrida se propuso como objetivo solucionar la desviación en los valores de la presión en el domo de vapor. Por lo tanto, se introdujeron una serie de componentes dedicados a regular la presión e inventario de agua en el primario.

4.3.1.1 Componente 170 (Feedwater tank Primario)

El feedwater tank del primario tiene como objetivo de proporcionar al sistema primario de agua y el de retirarla en el caso de que sea necesario.

4.3.1.2 Componente 171 (Inlet al plenum inferior)

El inlet al plenum inferior es una time dependent junction el cual desempeñara el papel de inyectar o remover agua del primario. El inlet toma de referencia a la presión del volumen 4 en el domo de vapor, y cuando el mismo empieza a desviarse de los valores de diseño, la unión toma la acción de inyectar agua si la presión baja o de extraer agua si la presión sube.

Si la presión excede los 12,5 MPa, el junction se activa y empieza a remover agua a un caudal de 20,5 kg/s. Caso contrario, si la presión se encuentra por debajo de 12,0 MPa, el junction inyecta agua a un caudal de 20,5 kg/s. Dentro del rango de 12,1 MPa a 12,4 MPa, el junction se encuentra inactivo y cierra la conexión entre el feedwater tank primario y el plenum inferior. Aquellos valores entre presiones no justificadas son simplemente interpolados.

Una vez alcanzado el estado estacionario deseado, el caudal de la unión se reduce a cero y el sistema primario queda aislado.

4.3.2 Resultados obtenidos en la segunda corrida

Una vez que se determinaron los componentes a implementar en la segunda corrida del programa, se confecciono el diagrama del modelo termohidráulico en el anexo 4.

Parámetros	Valor
Temperatura núcleo	299,30 °C – 315,69 °C
Presión en el volumen 4 del domo de vapor	12,403 MPa
Flujo másico	969,25 kg/s
Nivel de agua	7,736 m
Pérdidas de carga núcleo	377,29 Pa
Pérdidas de carga GV	2145,96 Pa

Tabla nº 10. Resultados de la segunda corrida.

Como se puede ver, la adición del feedwater tank y junction causaron una amplia mejora en los diferentes parámetros del núcleo. El nivel de agua levemente aumento, pero en un rango aceptable y la presión en el núcleo se mantuvo en límites aceptables. Las temperaturas levemente cambiaron hacia una mejor aproximación. La disminución del caudal es algo deseado debido a que se encuentra por un valor más de dos veces más alto que el de diseño, sin embargo, el cambio no fue suficiente. Por otro lado, las pérdidas de cargas en el núcleo disminuyeron, dejando otro margen para mejora.

4.4 Consideraciones y Resultados obtenidos en la tercera corrida

Partiendo del modelo anterior con el diagrama del Anexo 3, en la tercer corrida se decidió solamente ajustar valores ya presentes en las tarjetas los cuales fueron:

- Los límites en cual el time dependent junction no actúa para tratar de alcanzar valores de presión mucho más cercanos a los de diseño. Los nuevos límites en donde no actúa la unión fueron de 12,222 MPa a 12,228 MPa.

- Por último, se decidió modificar las pérdidas de carga en los diferentes componentes del sistema para llegar a un ajuste más fino. Todos los valores de las constantes fueron iterados hasta llegar a valores cercanos de diseño de las pérdidas de carga.
 - Núcleo: se añadió un término de pérdidas de carga con la constante 0,14.
 - Chimenea: se forzó una mayor pérdida de carga en la chimenea para alcanzar el total de perdidas en el circuito. Se fijó un valor de 0,23 en la constante de perdida de carga.
 - Generador de vapor: debido a la disminución que experimentaba las pérdidas de carga en el GV cuando se añadían más pérdidas de carga en los otros componentes, fue necesario adicionarle un término más. La constante se fijó en un valor de 0,5.

Luego de ajustar el modelo, se obtuvieron los siguientes valores:

Parámetros	Valor
Temperatura núcleo	300,33 °C – 322,70 °C
Presión en el volumen 4 del domo de vapor	12,329 MPa
Flujo másico	600,07 kg/s
Nivel de agua	7,388 m
Pérdidas de carga núcleo	1458,32 Pa
Pérdidas de carga GV	1907,03 Pa
Pérdidas de carga chimenea	158,01 Pa
Temperatura tope de chimenea	325,07 °C
Temperatura plenum inferior	298,22 °C

Tabla nº 11. Resultados de la cuarta corrida.

4.5 Cuarta corrida

4.5.1 Consideraciones para la cuarta corrida

Sin embargo, la última corrida todavía nos da una variación notable en el flujo másico y temperaturas del sistema. Luego de un breve análisis y consulta bibliográfica, se pudo determinar que la raíz del problema se da en las correlaciones utilizadas para calcular el coeficiente de transferencia de calor convectivo en los generadores de vapor. El código no tiene incorporado un modelo de componente que permita simular un intercambiador de calor de tipo helicoidal. Si bien el flujo podría contarse que es contra corriente a lo largo de la altura, tal suposición termina siendo errónea debido a que cada tubo individual tiene un mayor componente de flujo cruzado que contracorriente respectivamente con el refrigerante del primario. Debido a esto, el calor retirado por los generadores de vapor termina siendo menor que lo calculado utilizando las siguientes fórmulas empíricas aplicables a flujo externo en banco de tubos^[12]:

$$\overline{Nu_D} = 1,13 * C_1 * Re_{D,máx}^m * Pr^{1/3}$$

En donde Nu_D es el Nusselt, C_1 una constante que, de la geometría de los tubos, Pr es el Prandtl y $Re_{máx}$ es el número de Reynolds máximo que se alcanza cuando el fluido pasa entre tubos.

Para obtener el número de Reynolds máximo, es necesario hallar la velocidad máxima con la siguiente ecuación [12]:

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{S_T}{S_t - D} * V$$

En donde S_t es la distancia entre los tubos perpendicular al flujo (se asumió el paso radial de los tubos) y D el diámetro externo de los tubos.

Una manera de corregir esta desviación en el coeficiente convectivo es de modificar algún valor que sea proporcional al mismo. Debido a que se busca la temperatura y el único valor que se puede alterar es el área de transferencia, se aumenta de manera artificial el coeficiente convectivo al aumentar de manera proporcional el área de transferencia. Si la variación del índice convección entre el obtenido en la tercer corrida es dos veces mayor que el índice convectivo calculado a partir de las fórmulas empíricas, entonces es necesario aumentar el área de transferencia dos veces.

$$\dot{q} = 2h * A * \Delta T = h * 2A * \Delta T$$

h : coeficiente de transferencia de calor convectivo

A : área de transferencia

ΔT : Diferencia de temperaturas

q : Flujo de calor

Además, se sabe que el Nusselt es:

$$Nu_D = \frac{h * L}{k}$$

Luego de analizar con más detenimiento la tercer corrida y hallar coeficientes convectivos utilizando las ecuaciones que se propusieron, se obtuvieron los siguientes datos:

Parámetros	Valor
Coeficiente de transferencia de calor convectivo calculado por el código	7203,9185 W/(m ² *K)
Coeficiente de transferencia de calor convectivo obtenido por ecuación	25276,512 W/(m ² *K)

Tabla nº 12. Resultados del cálculo de los coeficientes de transferencia de calor convectivos de la tercer corrida.

Cómo era de esperarse, existe una diferencia entre ambos valores. La relación entre valores es de 3,51, por lo que, si se desea ajustar el modelo aún más, aumentar el área de transferencia 3,51 veces sería un buen punto de partida para las iteraciones de la cuarta corrida.

4.5.2 Valores de ajuste y resultados de la cuarta corrida

Luego de sucesivas iteraciones, se ajustó el modelo de la siguiente manera:

- Núcleo: el término de pérdidas de carga se lo fijo en 0,37.
- Chimenea: para la chimenea, se propuso un coeficiente de pérdidas de cargas de 0,38.
- Generador de vapor: por último, se propuso que el generador de vapor tenga un coeficiente de pérdidas de cargas de 2,2.
- Como se mencionó previamente, se debió realizar iteraciones para encontrar el área de transferencia que satisfaga los parámetros de diseño y se encontró que 1.5 veces el área de transferencia otorgaba resultados satisfactorios

Gracias al ajuste, se obtuvieron los siguientes resultados:

Parámetros	Valor
Temperatura núcleo	287 °C – 320 °C
Presión en el volumen 4 del domo de vapor	12,28MPa
Flujo másico	434,04 kg/s
Nivel de agua	7,56 m
Pérdidas de carga núcleo	1668,35 Pa
Pérdidas de carga GV	2399,04 Pa
Pérdidas de carga chimenea	153,48 Pa
Temperatura tope de chimenea	326,5 °C
Temperatura plenum inferior	284 °C

Tabla nº 13. Resultados de la cuarta corrida.

Como se pudo ver en la última corrida, los valores en el output del código convergieron hacia los valores de diseño. En la siguiente tabla, podemos observar las desviaciones que se obtuvieron en base a valores de diseño:

Parámetros	Valor diseño	Valor output	Error	Error porcentual
Temperatura min	284 °C	287 °C	3 °C	-----
Temperatura max	326 °C	320 °C	6 °C	-----
Presión	12,25 MPa	12,329 MPa	0,03 MPa	0,24 %
Nivel de agua	7,4 m	7,56 m	0,16 m	2,16 %
Pérdidas de carga Núcleo	1400 Pa	1668,35 Pa	268,35 Pa	19,17 %
Pérdidas de carga Chimenea	265 Pa	153,48Pa	111,52 Pa	42,08 %
Pérdidas de carga GV	2000 Pa	2399,04 Pa	399,04 Pa	19,95 %
Flujo másico	410 kg/s [7]	434,04 kg/s	24,04 kg/s	5,86 %

Tabla nº 12. Comparación de los resultados de la cuarta corrida con la valores de diseño.

Analizando la tabla nº 12 se puede ver que existe una desviación en las pérdidas de carga en chimenea. Esto era de esperarse ya que sus pérdidas de carga están fuertemente arraigadas al cambio de caudal que causan las otras pérdidas de cargas como la del núcleo y el GV. Todo esto provoca una elevada sensibilidad frente a pequeños cambios en el modelo, transformándola en un valor difícil de iterar. Sin embargo, al sumar todas las pérdidas de

carga, el error porcentual es de 15,17 % indicando que el aporte de pérdidas de cargas llevado a cabo por la chimenea es poco y, por lo tanto, su error no tiene un gran peso al compararlo con las otras pérdidas.

4.6 Análisis de pérdida de suministro eléctrico

Por último, se decidió poner el modelo a prueba con un estado transitorio simulando un accidente. El objetivo es el de analizar la evolución de la presión en el domo de vapor y observar en qué momento la válvula de alivio del sistema se activa.

4.6.1 Componentes 145 y 142 (Válvula de alivio y Contención)

El primer paso para poder llevar a cabo la simulación fue de añadir una válvula de alivio, la cual es un componente de interés para el análisis de accidentes. Para esto, se añadió el componente 145 el cual es un valve que conecta el domo de vapor del reactor con la contención. Fue necesario especificar que el tipo de válvula es de tipo moto válvula para condicionar trips de apertura y cerrado de la válvula.

Para el funcionamiento de la válvula, se debió definir dos trips:

- Trip 20: cuando la presión es mayor de 13,8 MPa, la válvula se abre.
- Trip 21: en caso de que la presión sea menor de 13,5 MPa, la válvula se cierra.

La presión de 13,5 MPa fue elegida en base a los valores de diseño a la cual el reactor puede operar sin inconvenientes.^[2] A este valor de diseño se le considero un margen de seguridad de 1 MPa.

Luego se tuvo que definir la contención con el componente 142, en donde se utilizó un volumen infinito como time dependent volumen. La contención se encontrará a presión y temperatura ambiente.

4.6.2 Simulación de la pérdida del suministro eléctrico

Para simular la pérdida del suministro eléctrico se realizó lo siguiente:

- El sistema evoluciona de manera normal durante los primeros 5000 segundos, imitando la corrida anterior para alcanzar el estado estacionario con valores de diseño.
- Luego de los 5000 segundos, dos particularidades suceden:
 - El reactor entra en SCRAM y su potencia empieza a disminuir imitando la evolución de la potencia de decaimiento.
 - El sistema secundario continúa circulando agua, pero a menor caudal hasta que pierde flujo por completo a los 5100 segundos.

4.6.3 Resultados de la simulación de pérdida del suministro eléctrico

Como se puede observar en la imagen nº 8, cuando se inicia la pérdida del suministro eléctrico a los 5000 segundos, el sistema rápidamente pierde presión. Esto es debido a un desbalance de energía en donde la potencia del núcleo cae de manera abrupta por el sistema de parada de emergencia mientras que las bombas del sistema secundario siguen rotando gracias a su volante de inercia. Como consecuencia, la temperatura y presión disminuyen al retirar calor del primario.

Sin embargo, el periodo de gracia otorgado por las bombas es corto y la falta de un sistema de extracción de calor residual se hace evidente de manera rápida. Luego, el desbalance del sistema se invierte cuando la potencia extraída del reactor se anula mientras el núcleo continúa generando calor residual. Con el tiempo, la potencia residual conlleva a un aumento de temperatura y consecuentemente a una mayor fracción de vapor, causando que la presión se eleve. Eventualmente, a las 2 horas, la válvula de alivio debe de abrirse.

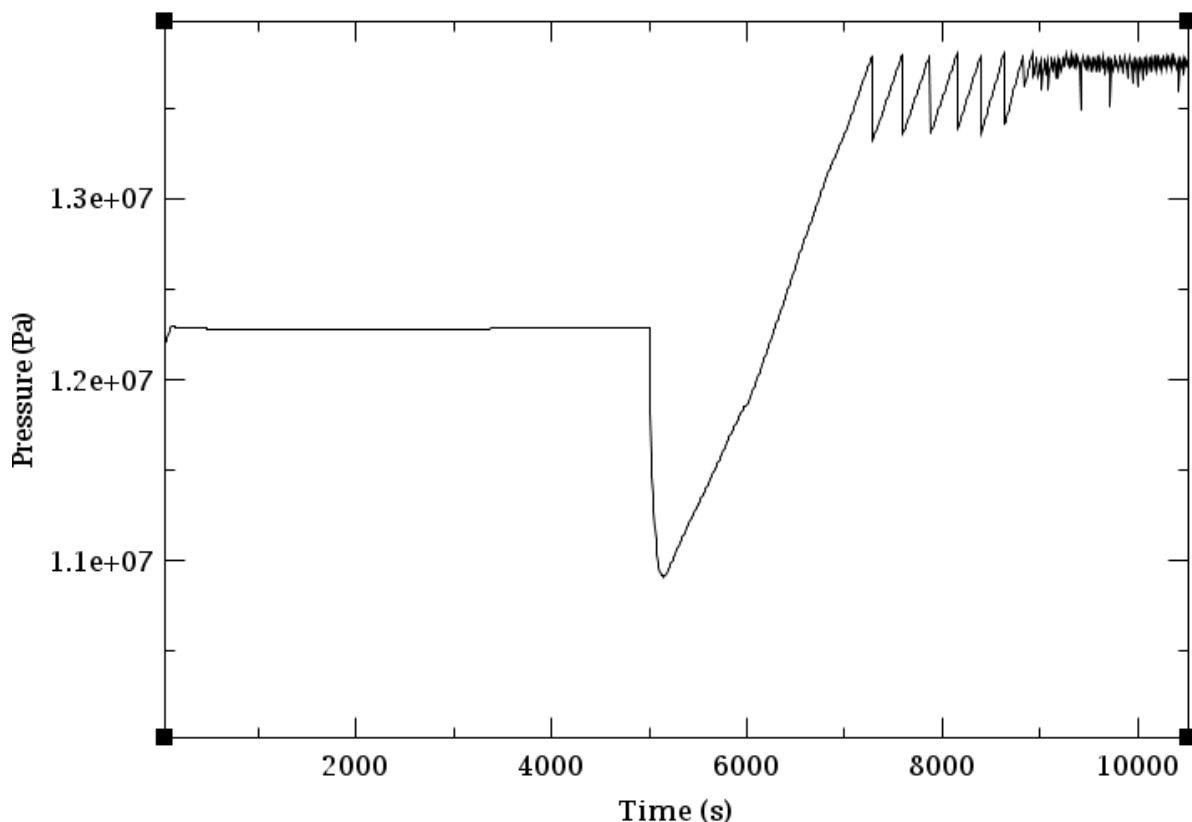


Imagen nº 9. Gráfico de la presiones a lo largo del tiempo durante pérdida del suministro eléctrico.

Por diseño, el reactor debería ser capaz de mantener una presión por debajo de la impuesta por el margen de seguridad por más de 36 horas. Pero, a diferencia del modelo confeccionado, el CAREM 25 cuenta con sistema de remoción de calor residual el cual incluye un condensador de emergencia sumergido en un tanque de agua. Tal tanque de agua posee un volumen lo suficientemente grande para mantener al reactor en un estado seguro por más de 36 horas.

5 Conclusiones

Se pudo ver que, para poder llevar el modelo a valores de diseño, fue necesario realizar varias iteraciones. Primero, se empezó corrigiendo la presión por medio de la adición de un par de componentes encargado de regular el inventario de agua del reactor. Luego, se trató de corregir la temperatura y caudal por medio de un aumento de las pérdidas de cargas, lo cual dio resultados positivos, pero no ideales. Por último, por medio de la consulta bibliográfica, se pudo observar que las correlaciones del programa calculaban un coeficiente convectivo mucho menor al real. Para corregir el coeficiente convectivo se modificó el área de transferencia, dándonos así un modelo con valores cercanos a diseño.

En general, la desviación de los errores se encuentra en rangos pequeños y dado a las simplificaciones llevadas en el modelo, se puede decir que se encuentran en un margen aceptable. Entre las desviaciones más significativas de los valores de diseño se encuentran las pérdidas de cargas las cuales eran de esperarse dado al elevado número de iteraciones que requirieron cada una de ellas en conjunto a las varias simplificaciones que se tomaron para modelarlas.

En conclusión, el modelo obtenido alcanzó un estado estacionario deseado, llevando al sistema a condiciones cercanas a las de diseño. Además, se pudo hacer un rápido análisis de la situación del reactor en caso de pérdida de suministro eléctrico. Si bien, existen simplificaciones y limitaciones, este modelo termohidráulico presenta la ventaja de ser simple, fácil de leer, proporciona varios datos de interés en el output y se puede modificar, lo cual permitiría analizar el sistema en condiciones transitorias. Tal propósito sería útil en el análisis de accidentes, por ejemplo, en situaciones de LOCA, escenario de Station Black-out o pérdidas de la fuente fría.

6 Bibliografía

[1]Marcel, C. P., Delmastro, D. F., Schlamp, M., & Calzetta, O. (2017). *CAREM-25: A safe innovative small nuclear power plant*; Sociedad Nuclear Española. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/66802>

[2]International Atomic Energy Agency. (2004). *Status of advanced light water reactor designs 2004*. Recuperado de <https://www.iaea.org/publications/7123/status-of-advanced-light-water-reactor-designs-2004>

[3]International Atomic Energy Agency. (2005). *Status of innovative small and medium sized reactor designs 2005*. Recuperado de <https://www.iaea.org/publications/7450/status-of-innovative-small-and-medium-sized-reactor-designs-2005>

[4]Delmastro D., Gómez S., Mazzi R., Gómez de Soler, G., Santecchia, A., & Ishida, V. (s/f). Características generales del reactor CAREM 25. Recuperado de https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/068/32068427.pdf

[5]Markiewicz, M. (2014). Fuel element for the CAREM-25 reactor. Recuperado de <https://las-ans.org.br/wp-content/uploads/2019/04/Panel-3-Oswaldo-Calzetta-July22-1030-1200.pdf>

[6]Gimenez, J. B. E. (2017) Análisis de potencia y cantidad de generadores de vapor helicoidal de paso simple para un reactor CAREM comercial usando el código SI-CARES. *Revista de la CNEA* <https://www.cnea.gob.ar/es/wp-content/uploads/2018/08/Revista-CNEA-67-68.pdf>

[7]Gimenez, J. B. E. & Delmastro, D.F. (2017) Análisis preliminar de un generador de vapor helicoidal con recirculación para un reactor CAREM comercial. *Revista de la CNEA*. Recuperado de <https://www.cnea.gob.ar/es/wp-content/uploads/2018/08/Revista-CNEA-67-68.pdf>

[8]Bibliografía otorgada por la catedra de centrales nucleares.

[9]International Atomic Energy Agency. (2021). What are Small Modular Reactors (SMRs)? Recuperado de <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>

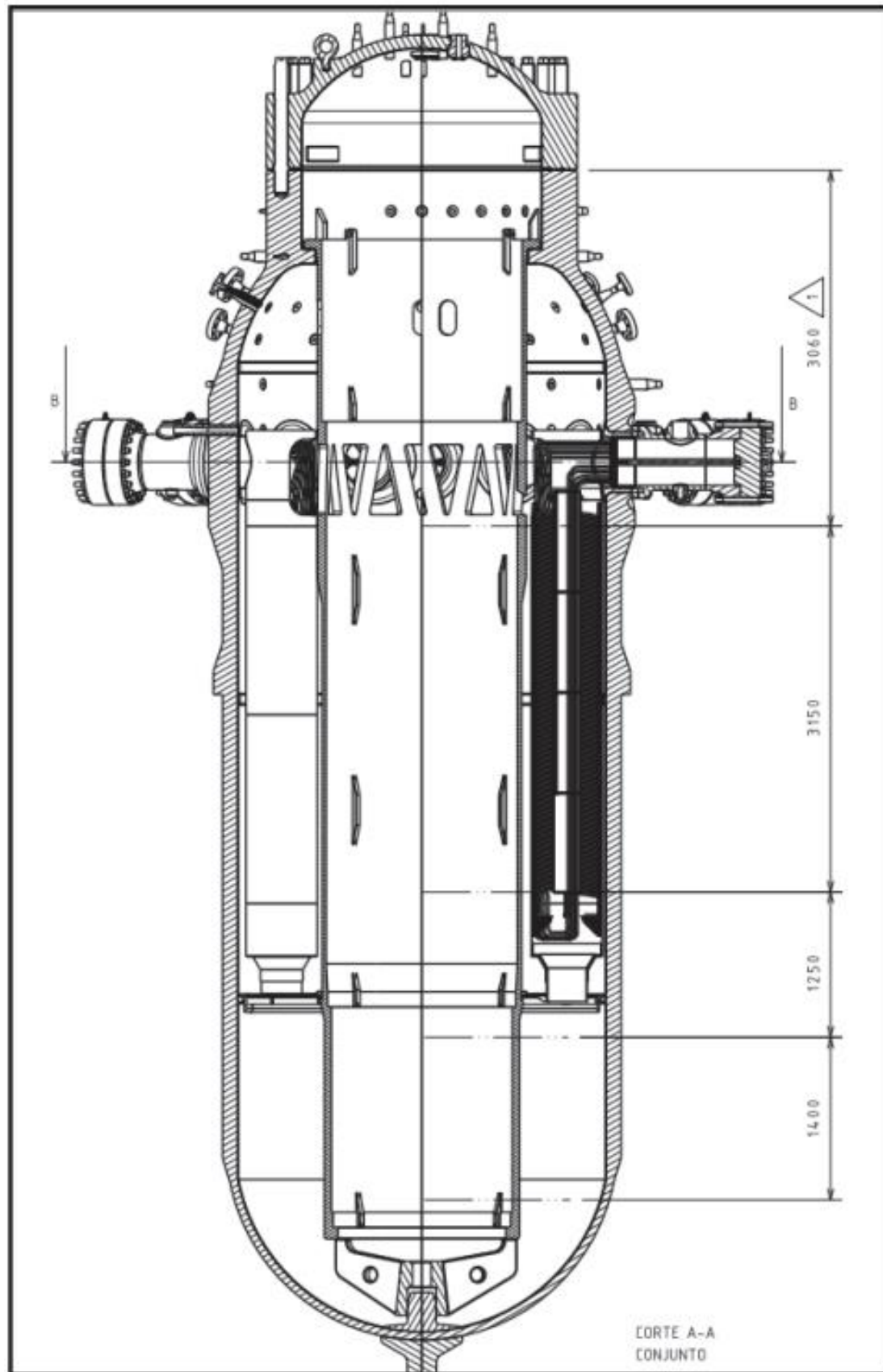
[10]Turina, L. (s/f). Central Nuclear CAREM: Otra Apuesta Argentina al Desarrollo de la Tecnología Nuclear. Recuperado de: <https://www.cnea.gob.ar/es/wp-content/uploads/files/02Boletin25Carem.pdf>

[11]Idaho National Laboratory (s.f) About RELAP5-3D Recuperado de: <https://relap53d.inl.gov/Shared%20Documents/About.pdf>

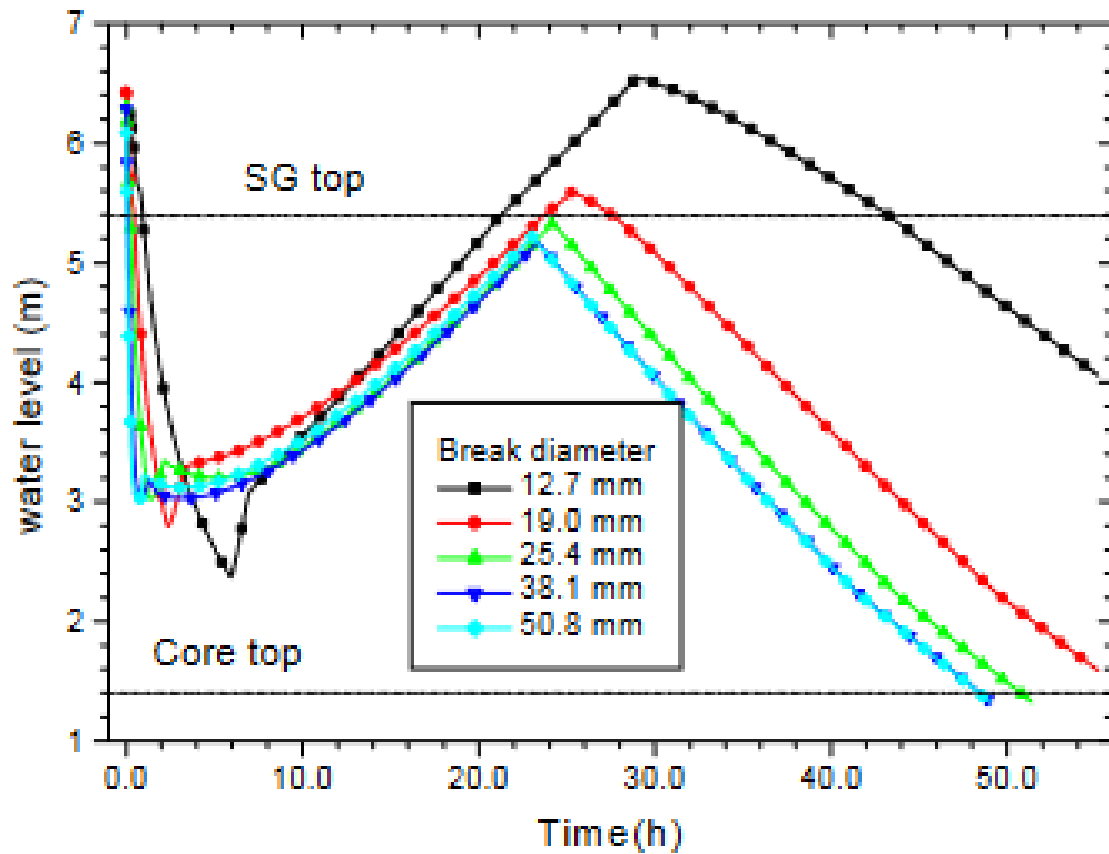
[12]DeWitt, D. P. & Incropera, F. P. (1999) Fundamentos de transferencia de calor (Cuarta edición).

7 Anexos

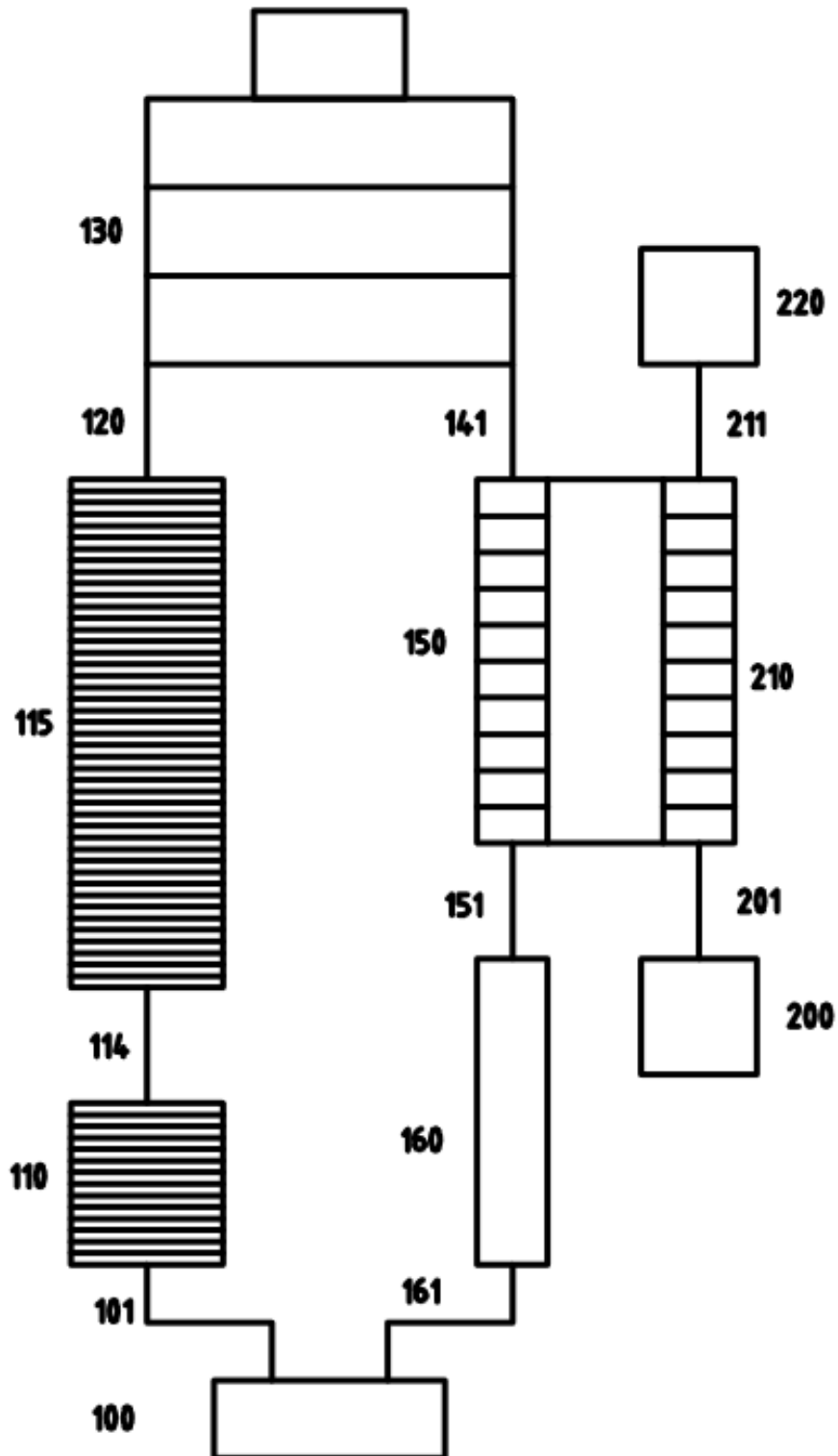
Anexo 1: Diagrama del recipiente de presión.



Anexo 2: Nivel de agua en el RPV ante pérdida de refrigerante debido a roturas de diferentes diámetros. ^[3]



Anexo 3: Diagrama del modelo termohidráulico de la primer corrida.



Anexo 4: Diagrama del modelo termohidráulico de la segunda corrida.

