

CÁLCULO DE MEJOR ESTIMACIÓN MÁS INCERTEZAS DE LA TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE Y DE VAINA EN UN CANAL COMBUSTIBLE DE LA CENTRAL NUCLEAR EMBALSE DURANTE UNA PÉRDIDA DE REFRIGERANTE

Dic '2018

Autor: Ing. Fernando Isaac Mugarbi

Director: Dr. Alejandro Iván Lazarte

ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE

Instituto Dan Beninson



ALUMNO: Ing. Fernando Isaac Mugaribí

TÍTULO: Cálculo de mejor estimación más incertezas de la temperatura del combustible y de vaina en un canal combustible de la central nuclear embalse durante una pérdida de refrigerante

PALABRAS CLAVE: Central Nuclear Embalse, LOCA, Wilks, Incertezas, Dakota.

LUGAR DE TRABAJO: Autoridad regulatoria nuclear - ARN - Av. del Libertador 8250 Cap. Fed.

DIRECTOR: Dr. Alejandro Iván Lazarte

FECHA DE INICIO: Febrero 2018

FECHA DE FINALIZACIÓN: Agosto 2018

AUTOR

DIRECTOR

RESUMEN

En este trabajo se presenta un cálculo de mejor estimación en TRACE5 Patch 4 de la temperatura de vaina y combustible durante un evento de pérdida de refrigerante en la Central Nuclear Embalse más un estudio de incertezas realizado con el código DAKOTA. La simulación consiste en el análisis del comportamiento de un canal combustible durante un LOCA del 40% del colector de entrada por un período de 20 segundos. El modelo, además, incluye los colectores tomados como condición de contorno, alimentadores, "end fittings" y el canal combustible.

El estudio de incertezas realizado sigue la metodología elaborada por el GRS, donde se eligen parámetros geométricos (como diámetros, entre otros), hidráulicos (pérdidas de cargas), térmicos (excursión de potencia) y factores multiplicativos en distintas correlaciones semiempíricas que serían variados aleatoriamente. Para determinar el número de cálculos para lograr obtener una cota superior con un 95% de probabilidad y con un 95% de confianza se empleará la fórmula de Wilks.

Los resultados evaluados son la temperatura de combustible y la de la vaina de Zircaloy, ambas para el caso mejor estimación y el caso mejor estimación más incertezas. El máximo valor obtenido para la temperatura de combustible es de 1882 °C cuando se consideran las incertezas, mientras que al no considerarlas es de 1613°C. Para la temperatura de vaina el máximo valor alcanzado es de 788 °C al considerar las incertezas, mientras que al no considerarlas se alcanza un valor de 612°C.

Se ha concluido que la temperatura de combustible se ve más afectada por la incertidumbre en el valor de la excursión de potencia y en la densidad del combustible; y la temperatura de vaina es afectada por la incertidumbre en la presión en el colector de descarga del canal combustible y en menor medida por la potencia y la pérdida de carga distribuida.

Acompañado al estudio de incerteza se evaluó la sensibilidad de los parámetros en el resultado utilizando un coeficiente de Spearman. De allí surgen cuáles son los parámetros que tienen mayor impacto en las figuras de mérito elegidas.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ÍNDICE	4
ABREVIATURAS	5
Índice de figuras	6
Capítulo 1: GENERALIDADES	7
1.1. Introducción	7
1.2. Objetivos	8
1.3. Estructura del trabajo	8
Capítulo 2: BASE TEORICA	9
2.1. Aspectos teóricos	9
2.2. Descripción de un CANDU6	14
2.2.1. Descripción de un canal combustible	15
2.2.2. Características del combustible	18
2.3. Descripción de una rotura en el sistema primario	19
2.3.1. Fenomenología durante una pérdida de refrigerante	19
2.4. Criterios de aceptación	21
2.5. Caso de estudio: rotura del 40 % en un colector de entrada	22
2.6. Variación de parámetros y sus efectos sobre los fenómenos	23
2.7. Descripción del TRACE5 Patch 4	25
2.8. Descripción del CODIGO DAKOTA	28
2.8.1. Cálculo de correlaciones	31
Capítulo 3: MODELADO Y SIMULACIÓN	32
3.1. Modelado del canal combustible en TRACE5	32
3.2. Pruebas de estado estacionario	34
3.3. Corridas de los transitorios y el caso de referencia	35
3.4. Comparaciones con otros resultados	35
Capítulo 4: FIGURA DE MERITO Y ESTIMACION DE INCERTEZAS	37
4.1. Superficie de respuesta	40
Capítulo 5: CONCLUSIONES	47
5.1. Futuros trabajos	47
REFERENCIAS	49
APÉNDICE	51

ABREVIATURAS

ARN	Autoridad Regulatoria Nuclear
AECL	Atomic Energy Canada Limited
APS	Análisis probabilístico de seguridad
BE	Mejor Estimación (Best Estimate)
BSI	Índice básico (Basic Subject Index)
BWR(s)	Reactor de agua liviana en ebullición (Boiling light-Water Reactor(s))
CHF	Flujo crítico de calor (Critical Heat Flux)
CNE	Central Nuclear Embalse
DBA	Accidente Base de Diseño (Design Basis Accidents)
DNBR	Margen al flujo crítico de calor
ECCS	Sistema de Enfriamiento de Emergencia del Núcleo (Emergency Core Cooling System)
EECC	Elementos combustibles
GRS	Global Research for Safety
GV(s)	Generador(es) de vapor
HX	Intercambiador de calor (Heat Exchanger)
LHS	Muestreo mediante el método Latin hypercube (Latin hypercube Sampling)
LOCA	Accidente con pérdida de refrigerante (Loss Of Coolant Accident)
OIEA	Organismo internacional de energía atómica
PCI	Interacción de la vaina con la pastilla combustible (Pellet Clad Interaction)
PWR(s)	Reactor de agua liviana presurizada (Pressurized light-Water Reactor(s))
RIH	Cabezal de entrada al reactor (Reactor Inner Header)
ROH	Cabezal de salida del reactor (Reactor Outer Header)
SPTC	Sistema Primario de Transporte de Calor

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Margen de seguridad y distintos límites según la metodología adoptada (conservadora o de mejor estimación)
- Figura 2.** Cálculo de mejor estimación con incertezas de la temperatura del centro del elemento combustible durante un LOCA.
- Figura 3.** Diagrama simplificado del SPTC de un reactor tipo CANDU6
- Figura 4.** Diagrama de un canal combustible de la CNE.
- Figura 5.** Flujo del refrigerante por el espacio anular en el extremo del canal.
- Figura 6.** Detalle del End Fitting de un canal combustible.
- Figura 7.** Presión en los colectores de entrada sanos y de los colectores de entrada que presentan la rotura para un reactor CANDU.
- Figura 8.** Interfaz del TRACE5 utilizando el SNAP
- Figura 9.** Etapas de cálculo utilizado por el TRACE5.
- Figura 10.** Menú principal del DAKOTA utilizando el SNAP.
- Figura 11.** Etapas de cálculo utilizado por el TRACE5 para el cálculo de incertezas.
- Figura 12.** Resultados de un modelo sin cálculo de incertezas y con cálculo de incertezas
- Figura 13.** Representación gráfica de pares de observaciones
- Figura 14.** Representación gráfica del modelo del canal combustible de la CNE
- Figura 15.** Caudal del canal combustible O6 para una potencia de canal de 6.8 MW y de 7.3 MW.
- Figura 16.** Temperatura de combustible y de vaina para un LOCA en condiciones nominales.
- Figura 17.** Evolución temporal del caudal másico en la entrada del canal O6 en un LOCA para el modelo elaborado en RELAP5 y en TRACE5.
- Figura 18.** Evolución temporal del caudal másico en la salida del canal O6 durante el evento LOCA para el modelo elaborado en RELAP5 y en TRACE5.
- Figura 19.** Representación gráfica de las temperaturas de combustible obtenidas de las 93 corridas de TRACE con el valor del criterio de aceptación.
- Figura 20.** Temperatura de combustible para el máximo valor con incertezas y el caso BE para un LOCA.
- Figura 21.** Temperatura de combustible en función del factor de potencia.
- Figura 22.** Temperatura de combustible en función del factor de densidad de combustible.
- Figura 23.** Representación gráfica de las temperaturas de vaina obtenidas de las 93 corridas de TRACE con los valores del criterio de aceptación y temperatura de fusión del Zircaloy.
- Figura 24.** Temperatura de vaina para el máximo valor con incertezas y el caso BE para un LOCA.
- Figura 25.** Variabilidad de la temperatura de vaina en función del factor de presión del colector de salida.
- Figura 26.** Variabilidad de la temperatura de vaina en función del factor de potencia.
- Figura 27.** Variabilidad de la temperatura de vaina en función del factor de rugosidad.
- Figura 28.** Correlación de los distintos parámetros a la variación de la temperatura de combustible.
- Figura 29.** Aporte a la variación de la temperatura de vaina de los distintos parámetros con incertezas.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear Embalse es una planta de tipo CANDU (PHWR) de generación II que tendrá una potencia aproximada de 2061.4 MWt y 682.5 MWe (valores esperados de la CNE luego del reacondicionamiento). La central diseñada por AECL comenzó a construirse en mayo de 1974 finalizando la obra a mediados del año 1981.

La CNE utiliza uranio natural como combustible y agua pesada como fluido refrigerante y moderador. El reactor es del tipo de tubos de presión, con 380 canales combustibles que atraviesan la calandria, la cual contiene al fluido moderador.

El sistema primario consta de dos circuitos compuesto cada uno de ellos por dos bombas, dos generadores de vapor, un colector de entrada, un colector de salida, 380 alimentadores, 190 canales combustibles y un presurizador que es compartido por los dos circuitos.

El sistema primario opera a una presión de 11.3 MPa medidos en los colectores de entrada y a una temperatura de entrada al canal combustible de 262° y 309 °C a la salida. El sistema moderador se encuentra aislado del refrigerante y opera a una presión de 0.1013 MPa y una temperatura de 70 a 74 °C.

El sistema secundario alimenta con agua liviana el lado carcasa de los generadores de vapor a una presión aproximada de 4.83 MPa, con una temperatura de entrada de 187 °C y una temperatura de salida de 260 °C.

La regulación de la reactividad es llevada a cabo por 4 barras de control de cadmio, 21 barras ajustadoras de cobalto y 14 zonas líquidas (recipientes de agua liviana). Para la extinción de la reacción nuclear se cuenta con dos sistemas de parada. El sistema de parada N°1 está compuesto por dos bancos de 14 barras de cadmio. El sistema de parada N°2 posee seis tanques de veneno neutrónico (Gd_2O_3) los cuales se inyectan en la calandria.

El diseño de la CNE está basado en límites de dosis. Los cuales varían según el tipo de falla por el cual se produce la irradiación. Una falla grave de los sistemas de proceso está definida como cualquier falla de un equipo de proceso o procedimiento que conduzca a una liberación significativa de material radiactivo en ausencia de una acción de seguridad. Una evaluación del diseño de la CNE se encuentra fuera del alcance de este trabajo pero mayores detalles pueden encontrarse en [1].

1.2. OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo son:

- a) El estudio detallado del comportamiento de un canal y del combustible en un reactor CANDU6 durante un evento LOCA del 40% en un colector de entrada.
- b) Elaboración de un modelo en TRACE5 que represente la fenomenología que ocurre en un canal combustible de la CNE operando a plena potencia y durante un evento.
- c) Cálculo de incertezas en el análisis de seguridad "Best Estimate" del evento postulado.
- d) Obtención del margen que se dispone entre las simulaciones con valores nominales y su rango de incertezas con respecto los valores de los criterios de aceptación.

1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo consiste en 5 capítulos, incluyendo este. En el siguiente capítulo se describirá un marco teórico sobre el uso del cálculo de incertezas en las simulaciones "Best Estimate". Se desarrollará también una descripción de la ingeniería básica de un CANDU6. Se describirá los fenómenos ocurridos durante una rotura del 40% de un colector de entrada. Por lo tanto, se realizará una descripción del código de sistemas TRACE5 y del plug-in DAKOTA, siendo este último la herramienta utilizada para el cálculo de incertezas y sensibilidad.

En el capítulo 3 se detallará el modelo desarrollado en TRACE5 del canal y del combustible, describiendo los distintos componentes utilizados, y las condiciones iniciales y de contorno impuestas durante el transitorio.

Por otro lado, en el capítulo 4 se discutirán la selección de los parámetros que podrían generar la mayor variabilidad en los criterios de aceptación aplicables al evento simulado. Se darán los rangos de variabilidad de los parámetros mencionados y se obtendrá del rango de incertezas utilizando la metodología propuesta por Wilks.

El capítulo 5 consistirá en la presentación de los resultados del cálculo y el tratamiento de datos, en conjunto a las conclusiones.

CAPITULO 2

BASE TEORICA

2.1. ASPECTOS TEORICOS

La práctica internacional habitual referente a la seguridad nuclear utiliza comúnmente dos enfoques:

- El probabilístico, comúnmente denominado APS (Análisis Probabilístico de Seguridad). Este análisis se basa en la determinación de la frecuencia de daño al núcleo frente a un conjunto de posibles eventos que pueden ocurrir con una determinada probabilidad. Para el mencionado análisis se utilizan dos herramientas: árboles de fallas y árboles de eventos [2].
- El determinístico, del cual se trata el presente trabajo, evalúa la respuesta de los distintos sistemas de la instalación ante un determinado evento. Para ello se utilizan una serie de reglas y criterios de aceptación que se basan en aspectos neutrónicos, termohidráulicos, radiológicos, termomecánicos y estructurales. Los análisis son realizados, en general, utilizando usando códigos como RELAP5, TRACE5, CATHENA [3].

El análisis determinístico de seguridad puede utilizarse para determinar la eficiencia y viabilidad de los sistemas de seguridad dentro del concepto de defensa en profundidad de una central nuclear.

El objetivo del análisis determinístico es demostrar que la planta puede ser operada con seguridad dentro de los límites regulatorios establecidos relacionados con la integridad de los componentes, la preservación de las funciones de seguridad y las barreras frente a las emisiones de radiactividad.

El análisis determinístico a su vez contempla dos metodologías de cálculo, la conservadora y la de mejor estimación (en el idioma inglés, "Best estimate"). La adopción de una u otra metodología es función de la normativa regulatoria de cada país, Tabla 1 [4].

La metodología conservadora proporciona una estimación pesimista de un evento seleccionado para un criterio de aceptación específico. A su vez un código de cálculo conservador utiliza los modelos necesarios para proporcionar una estimación pesimista de los procesos del evento. Y los datos conservadores proporcionan los parámetros de planta, condiciones iniciales y disponibilidad de equipos tales para dar un resultado pesimista en relación a un criterio de aceptación en específico.

La metodología de mejor estimación proporciona una estimación realista del evento consistente con las condiciones operativas habituales. Mientras que un código de mejor estimación proporciona una respuesta global realista de la planta durante un accidente y no se consideran

hipótesis pesimistas o conservadoras. Los datos realistas utilizados: parámetros nominales de planta, condiciones iniciales y disponibilidad de equipos son tales como para producir resultados realistas.

Tabla 1. Enfoque conservador y de mejor estimación del análisis determinístico.

Opción	Código de sistemas	Disponibilidad de sistemas	Condiciones iniciales y de contorno
Conservadora	Conservador	Hipótesis Conservadoras	Datos de entrada conservadores
Combinada	Mejor estimación	Hipótesis Conservadoras	Datos de entrada conservadores
Mejor Estimación	Mejor estimación	Hipótesis Conservadoras	Realistas más incertidumbres en parte condiciones más desfavorables
Informada de riesgo	Mejor estimación	Derivada del APS	Datos de entrada realistas con incertidumbres

En Canadá, por ejemplo, el enfoque para el análisis de seguridad de reactores tipo CANDU5 utiliza una combinación de un código de sistema "Best estimate" en lo relativo a los modelos físicos e hipótesis conservadoras seleccionadas en los parámetros de entrada [5].

Para los escenarios de accidente con grandes márgenes en los criterios de aceptación, resulta apropiado por su simplicidad y, por ende, su economía, utilizar un análisis conservador (sin evaluación de incertidumbres). Para los escenarios en los que el margen es más reducido, es necesario efectuar un análisis de mejor estimación para cuantificar el conservadurismo.

Un análisis de mejor estimación (metodología adoptada en el presente trabajo) asegura que el comportamiento previsto de la planta considerando una cierta incerteza en el cálculo incluye al valor real, como se observa en Figura 1.

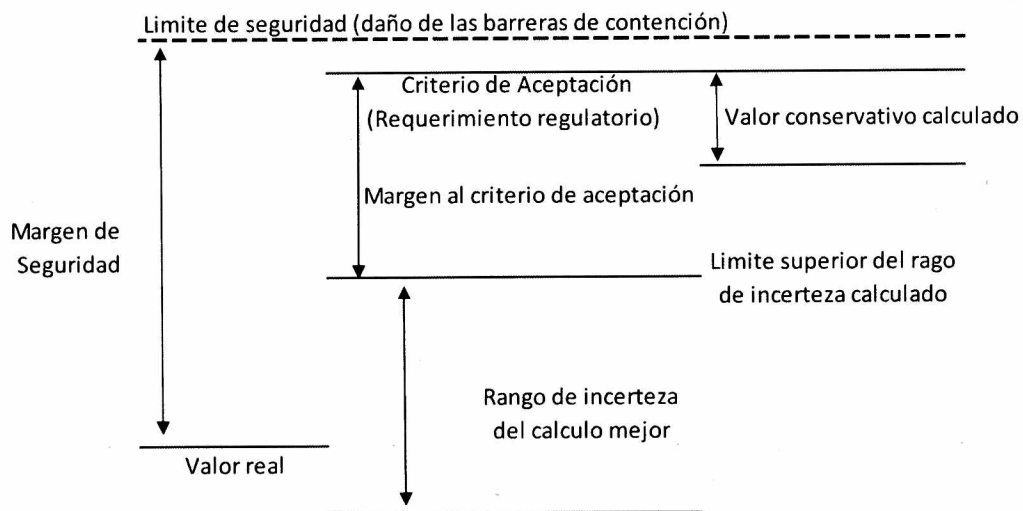


Figura 1. Margen de seguridad y distintos límites según la metodología adoptada (conservadora o de mejor estimación)

La motivación para el uso de mejor estimación viene dado por:

- Una evaluación más realista de los márgenes de seguridad de la planta en la etapa de licenciamiento.
- Mejoras en la respuesta a la emergencia, cuando esta se basa en una evaluación realista.
- Identificar los parámetros que tienen mayor impacto en los resultados de los cálculos de forma de darle prioridad en el desarrollo del modelo y en futuros experimentos.

El cálculo de incertezas a su vez puede seguir distintas metodologías. El GRS (Global Research for Safety), es una organización alemana que realiza análisis de seguridad de reactores, gestión de desechos radiactivos, protección contra la radiación y resguardo del medio ambiente [6]. El método que propone es probabilístico basado en el concepto de propagación de las incertezas que se introducen en: los datos de entrada, propios del código, de la representación de la instalación en el modelo, de los datos de planta, etc. [7].

Las fuentes de las incertezas que afectan al modelo son de diverso tipo. Entre ellas:

- Incertezas del modelo, dadas por suposiciones y simplificaciones.
- Incertezas en los datos experimentales utilizados, dado por errores en los instrumentos de medición, medición en las propiedades de los materiales, uso de librerías de datos.
- Incertezas en los datos de planta, dadas por tolerancias en la manufactura de los componentes, variación en la operación de la planta, imposibilidad de medición de ciertos parámetros.

- Incertezas en la representación del modelo, aproximaciones hechas en la geometría de la instalación, tamaño de los volúmenes de control, condiciones de contorno e iniciales.
- Incertezas dadas por errores de interpretación de la información del usuario, como lo son, distintos tipos de nodalizaciones, diferentes estados estacionarios de los cuales parte el evento accidental, interpretación de resultados y tratamiento de los datos.

Las distintas incertezas identificadas serán cuantificadas de forma de poder generar el rango de variación y la función de distribución que siguen.

La parte principal del método consiste en un conjunto de técnicas estadísticas con la ventaja de que el número de ejecuciones del código es independiente del número de parámetros con incertezas que son utilizados. En cada uno de los cálculos realizados por el código todos los parámetros con incertezas varían simultáneamente.

Cada parámetro con incerteza producirá una variación más o menos pronunciada de los resultados. La cantidad de parámetros con incertezas puede ser muy elevada, de forma que en ciertos casos es deseable reducir su número descartando aquellos que su impacto en los resultados es pequeño (menor a un umbral). Dado que el número de cálculos llevados a cabo por el código (de ahora en adelante se denominará al cálculo como corrida) y el número de parámetros utilizados es independiente no es necesario realizar dicho descarte con anticipación.

El número de corridas a realizar por el código será función de la probabilidad y confianza que se espera conseguir en el cálculo de incertezas. El número mínimo de cálculos requeridos (n) está determinado por la fórmula de Wilks [6]. Esta variará en su forma según se evalúe un solo extremo de la distribución.

$$(1 - \alpha)^n \leq \beta \quad (1)$$

O si se evalúa ambos extremos de la distribución.

$$1 - \alpha^n - n \times (1 - \alpha) \times \alpha^{n-1} \leq \beta \quad (2)$$

Siendo n el número de cálculos a realizar, β la confianza y α la probabilidad de que al menos el cierto porcentaje de los casos cumplan con márgenes de seguridad.

A partir de estas dos inecuaciones surgen los números mínimos de corridas de código necesarias a realizar para un determinado nivel de confianza y probabilidad, como puede observarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Número mínimo de cálculos a realizar según Wilks para distintos valores de confianza y probabilidad.

α	B	Un lado de la distribución			Ambos lados de la distribución		
		0.9	0.95	0.99	0.9	0.95	0.99
0.9		22	45	230	38	77	388
0.95		29	59	299	46	93	473
0.99		44	99	459	64	130	663

En general, si se desconoce la distribución probabilista de algún parámetro, se adopta una distribución uniforme.

En la Figura 2, a modo de ejemplo, se observa el resultado de la aplicación del método obteniendo el valor de la temperatura del centro de la pastilla combustible de mejor estimación, y la banda superior e inferior obtenida de un cálculo de incertezas. El mismo fue realizado por AECL, en el cual se analiza un LOCA grande [8].

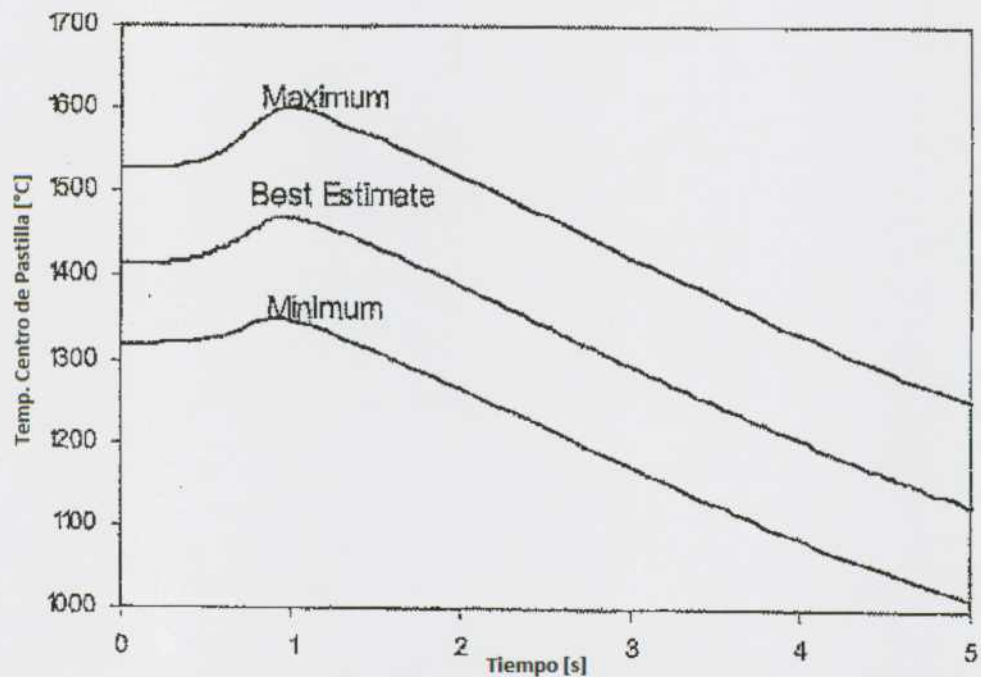


Figura 2. Cálculo de mejor estimación con incertezas de la temperatura del centro del elemento combustible durante un LOCA.

2.2. DESCRIPCION DE UN CANDU6

El CANDU6 (CANadian Deuterium Uranium) es un reactor de tipo PHWR de tubos de presión, con sus canales combustibles con disposición horizontal. Este utiliza agua pesada (D_2O) como fluido refrigerante y moderador.

La Central Nuclear Embalse, un CANDU6, generó 648 MWe durante su vida útil entre 1984 y 2015. Este valor se ha incrementará a 682.5 MWe con el proyecto de extensión de vida. La CNE contiene 380 canales combustibles, dispuestos en dos circuitos independientes, los cuales son comúnmente denominados SPTC (Sistema Primario de Transporte de Calor). Cada circuito cuenta con 190 canales, 95 de ellos circulan en un sentido y los 95 restantes en sentido contrario, tal como se observa en la Figura 3.

Los alimentadores son los encargados de unir cada uno de los canales combustibles a los colectores. La calandria posee 760 conexiones, dos por cada alimentador, 380 de entrada y 380 de salida [9].

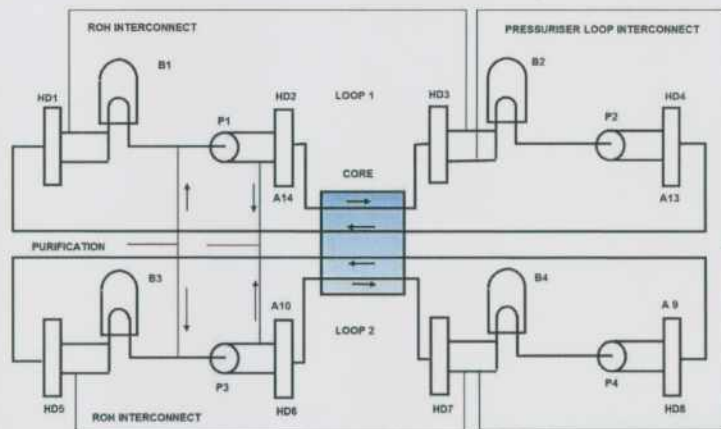


Figura 3. Diagrama simplificado del SPTC de un reactor tipo CANDU6

Cada circuito está compuesto por:

- Dos generadores de vapor de tubos en U, con el sistema primario circulando por el interior de los tubos y el sistema secundario por lado carcasa.
- Dos bombas centrífugas de una sola etapa, con una succión y dos descargas.
- Dos colectores de entrada al reactor (numerados con números pares: HD2, HD4, HD6 y HD8) y dos colectores de salida del reactor (numerados con números impares: HD1, HD3, HD5 y HD7).
- Cañerías que interconectan los equipos.

Ambos circuitos se encuentran vinculados a través del presurizador.

El sistema secundario que trabaja a 4.7 MPa (abs) y 260 °C está compuesto por:

- una turbina con una etapa de alta presión y tres de baja presión

- un condensador
- y bombas de condensado y de alimentación.

El sistema moderador es el encargado, entre otras cosas, de termalizar los neutrones rápidos generados en los EECC. Por este fluye agua pesada a baja presión y temperatura, 0.1013 MPa y 71°C, absorbiendo una potencia de 120 MWt. El circuito está compuesto por:

- el tanque de calandria (en el cual se encuentran los canales combustibles)
- dos bombas, cada una con un motor principal y uno auxiliar.
- dos HX, cada uno de ellos del 50% de capacidad.
- un tanque de cabeza, el cual absorbe las variaciones de volumen por temperatura.

Tabla 3. Condiciones nominales de la CNE (una vez finalizada la extensión de vida).

Variable	Valor	Unidad
Potencia térmica	2061.4	MWt
Potencia eléctrica (estimada para el proyecto de extensión de vida)	682.5	MWe
Refrigerante y moderador	D2O	-
Presión en colector de entrada del reactor	11.3	MPa(a)
Presión en colector de salida del reactor	9.99	MPa(a)
Temperatura Primario	Tentrada: 260-267 Tsalida: 310	°C
Máximo título de a la salida del canal	0.04	-
Presión moderador	0.1013	MPa(a)
Temperatura moderador	71	°C
Presión GV	4.7	MPa(a)
Temperatura GV	<u>Lado H2O</u> : Tent: 187 Tsal: 260	°C

2.2.1. DESCRIPCIÓN DE UN CANAL COMBUSTIBLE

Un esquema de un canal combustible [10] se muestra en la Figura 4.

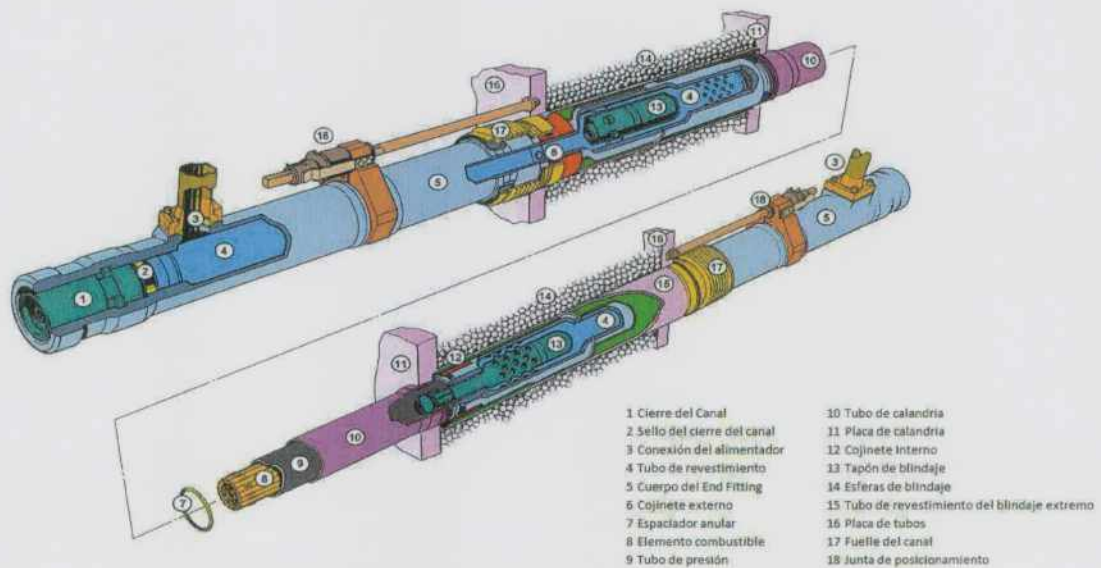


Figura 4. Diagrama de un canal combustible de la CNE.

El refrigerante ingresa a través de los alimentadores a los denominados "end fittings", y fluye por el espacio anular formado entre este último y el tubo de revestimiento (identificado con el número 4 de la Figura 4). Luego, el agua pesada ingresa al interior del tubo de presión por las perforaciones que posee el tubo de revestimiento en uno de sus extremos (Figura 5). El refrigerante fluye por el espacio libre entre las barras combustibles y el tubo de presión, hasta el otro extremo del canal, y al llegar al alimentador realiza un recorrido similar que al ingresar al canal.

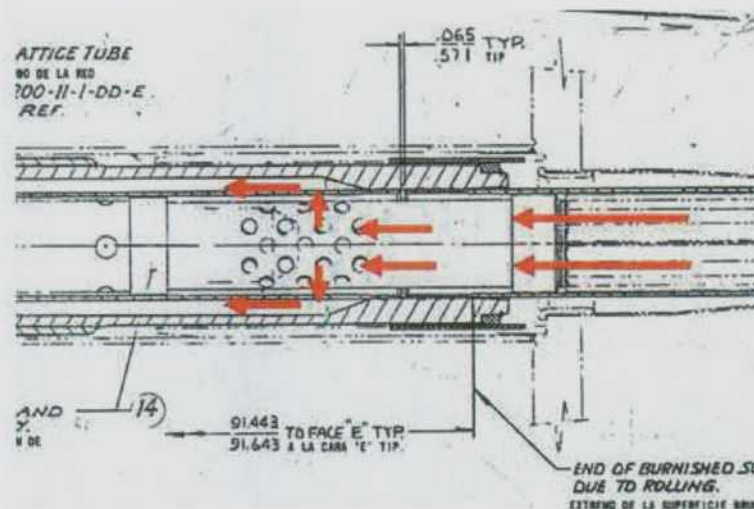


Figura 5. Flujo del refrigerante por el espacio anular en el extremo del canal.

Cada canal combustible presenta una potencia diferente que será función de la posición en el núcleo, siendo mayor en el centro que en la periferia y de ahí el caudal que circulará por el mismo.

Tubos de Presión

El canal combustible está diseñado para contener a los elementos combustibles y permitir el paso del refrigerante a fin de poder extraer la potencia generada. Este está compuesto por un tubo de presión (TP) de Zirconio-Niobio de 5.94 m de longitud y 0.1053 m de diámetro interno, expandido en cada extremo contra una boquilla terminal (end fittings).

Tubos de Calandria

Los tubos de presión son rodeados por los tubos de calandria (TC), estos últimos están en contacto en su superficie externa con el fluido moderador y en el espacio anular formado entre el TP y el TC contiene CO_2 (ver Figura 4). Este gas actúa como aislante térmico y es usado para detectar fugas de agua pesada y evitar la corrosión.

End Fittings

Los tubos de presión, en cada uno de sus extremos se conectan por medio de una conexión rolada a unos dispositivos que sirven de prolongación, denominados "End Fitting" (ver la Figura 6).

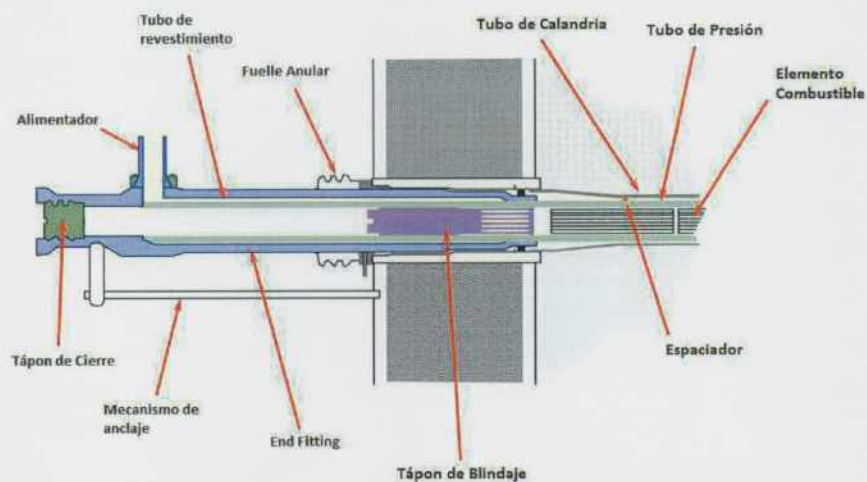


Figura 6. Detalle del End Fitting de un canal combustible.

Los end fittings permiten la conexión a los tubos de presión de los alimentadores y de la máquina de recambio de elementos combustibles. Cada uno de los end fittings posee un tapón de cierre, el cual se retira al momento de realizar el cambio de EECC.

Cada canal posee dos end fittings, de los cuales uno de ellos posee un mecanismo de anclaje, dejando libre el otro extremo a fin de no producir tensiones por la dilatación que sufre el canal combustible por el aumento de temperatura.

Colectores

Los colectores son el nexo entre la descarga de las bombas y generadores de vapor del SPTC, según sean colectores de entrada o salida respectivamente, y los alimentadores (que serán tratados a continuación). Cada circuito posee cuatro de ellos, dos de entrada al reactor y dos de salida.

A los ocho colectores se los divide en colectores de entrada al reactor (numerados con números pares: HD2, HD4, HD6 y HD8) y de salida del reactor (numerados con números impares: HD1, HD3, HD5 y HD7).

Alimentadores

El SPTC cuenta con 760 alimentadores (Feeders) que conectan los colectores con los end fittings. El tipo de alimentador dependerá del caudal, de su posición en el núcleo y si es de entrada o de salida.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE

Cada canal contiene 12 elementos combustibles, de uranio natural (0.72% de ²³⁵U). Cada elemento combustible es un manojo de 37 barras combustibles dispuestas en tres coronas concéntricas (6, 12 y 18 vainas combustibles, respectivamente) y con un elemento central. Cada uno de ellos posee una longitud de 49.5 cm. En los extremos del manojo de combustibles se encuentra soldado, a las vainas, un redistribuidor de flujo que mantiene la forma del EECC y le proporciona estabilidad mecánica. El espacio libre entre la pastilla combustible y la vaina es ocupado por Helio a una presión próxima a la atmosférica 101.3 kPa.

En la Tabla 4 se presentan valores geométricos característicos de un canal y del combustible, según [10].

Tabla 4. Datos geométricos del elemento combustible.

Generalidades	
Longitud del elemento combustible (manejo)	495.30 ± 0.76 mm
Vaina	
Diámetro externo	13.08 ± 0.04 mm
Espesor de pared	0.42 ± 0.04 mm

2.3. DESCRIPCIÓN DE UNA ROTURA EN EL SISTEMA PRIMARIO

El accidente con pérdida de refrigerante, comúnmente llamado por su sigla en inglés LOCA ("Loss Of Coolant Accident"), es uno de los eventos accidentales más estudiados para la evaluación de la seguridad de una central nuclear [11].

Comúnmente los accidentes con pérdida de refrigerante son agrupados en dos grandes categorías dependiendo del área de la rotura:

- LOCA grande (LBLOCA: Large Break LOCA)
- LOCA chico (SBLOCA: Small Break LOCA)

Otro de los puntos determinantes en la secuencia accidental y su fenomenología es la ubicación. Una rotura en el sistema primario evolucionará de forma distinta a si esta se produjera en una cañería de agua de alimentación o en el sistema moderador. Asimismo, roturas en distintas posiciones del sistema primario también evolucionarán de manera diferente. En general, si bien los fenómenos son similares entre sí, los tiempos característicos de ocurrencias de estos pueden diferir.

2.3.1. FENOMENOLOGÍA DURANTE UNA PÉRDIDA DE REFRIGERANTE

Se puede generalizar las etapas de un LOCA, por ejemplo en un PWR, en tres: despresurización, relleno y reinundación (Blowdown, Refill y reflooding, respectivamente). La duración de dichas etapas depende principalmente de la ubicación y tamaño de la rotura. Por ejemplo un SBLOCA producirá una despresurización lenta del sistema comparada con la despresurización de una rotura más grande y, por lo tanto, las mencionadas etapas ocurrirán en instantes distintos. En la Figura 7 se representa la presión en los colectores de los circuitos sanos (RIH2 y RIH4) y de los que presentan la rotura (RIH6 y RIH8) de una central del tipo CANDU, además del momento en el cual actúan las tres etapas del ECCS [12].

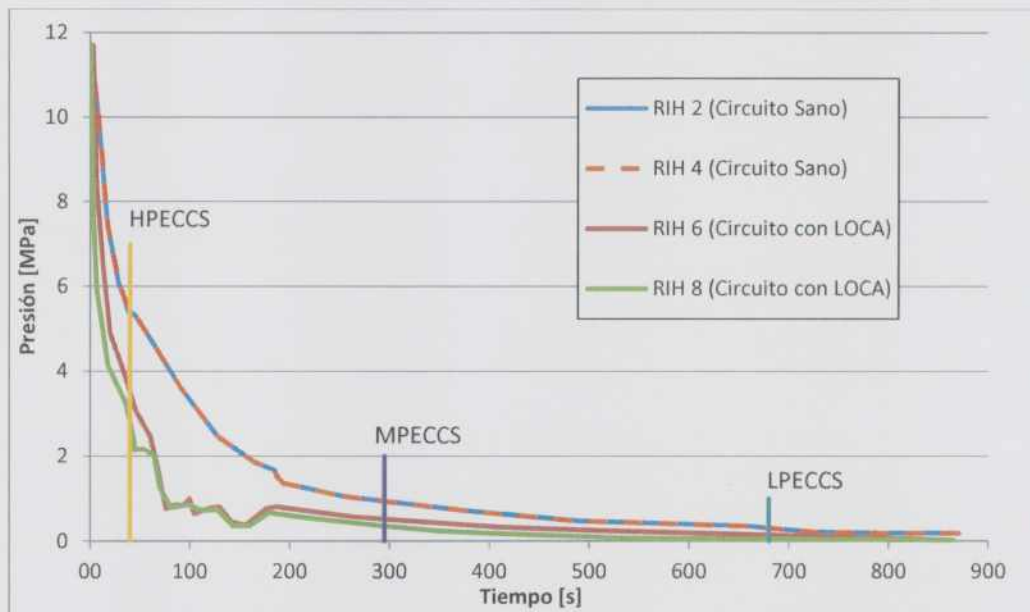


Figura 7. Presión en los colectores de entrada sanos y de los colectores de entrada que presentan la rotura para un reactor CANDU [12].

Antes de producirse una rotura el refrigerante se encuentra, a la salida del núcleo, en condiciones próximas a las de saturación, como las citadas en la Tabla 3. Al producirse una rotura, el sistema primario se despresuriza rápidamente y descarga contra la presión de la contención. La tasa de despresurización será función del tamaño de la rotura.

El fluido refrigerante al despresurizarse contra la atmósfera de la contención, se vaporiza por el cambio de presión, por un fenómeno que comúnmente se conoce como "Flashing". En los primeros instantes el caudal de la rotura se ve limitado por el fenómeno de flujo crítico de descarga, que se da cuando el vapor alcanza la velocidad de propagación del sonido en las condiciones de salida. Este fenómeno, flujo crítico de descarga, el caudal de descarga es solo función de las condiciones aguas arriba de la rotura. .

La pérdida de refrigerante por la rotura provoca una disminución del inventario que en los canales combustibles, siendo posible el descubrimiento de los mismos.

Dado que las centrales del tipo CANDU6 poseen un coeficiente de reactividad por vacío positivo, se produce un aumento de la potencia en los elementos combustibles, que sumada a la disminución del caudal de refrigerante puede provocar la vaporización de este.

El corte del reactor se producirá por el desvío de alguna de las variables operativas (alta presión en contención, alta potencia, bajo nivel en el GV, alta presión en el SPTC primario, bajo caudal en el SPTC, etc.) provocando la actuación del SP N°1 y/o SP N°2.

Según el tamaño de la rotura, se perderá en mayor o menor inventario y por lo tanto se irá produciendo el vaciado del sistema primario y perdiendo la capacidad de refrigeración. Con la reducción de presión, se producirá el comienzo de inyección de agua de emergencia (del sistema ECCS por su sigla en el inglés) de la etapa de alta presión, media presión y baja presión dependiendo el diseño del reactor.

Recuperado el inventario, se debe refrigerar el núcleo a largo plazo para eliminar el calor de decaimiento. Esto es llevado a cabo por la etapa de baja presión del ECCS. De esta manera se podrá mantener de forma indeterminada la refrigeración del núcleo. Una descripción más detallada del evento se encuentra en [13].

2.4. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

A fin de garantizar la seguridad, los resultados obtenidos de las simulaciones son contrastados con valores preestablecidos, los cuales se los denomina criterios de aceptación.

En la Tabla 5 se listan los criterios de aceptación para la CNE que derivan de los criterios en la norma R-6 [1].

Tabla 5. Criterios de aceptación para la CNE.

Característica	Requisito	Concepto	Tipo de Evento
Temperatura del combustible	< 2840°C	Temperatura del centro de la pastilla de UO ₂ .	LOCAs grandes
Temperatura de vaina	<1760°C		LOCAs grandes
	< 800°C	Integridad del combustible	
	< 600°C		Todos
Dry out	• 1 ^{er} disparo antes de la primer ocurrencia.	Integridad del combustible	Todos
	• 2 ^{do} disparo asegura T _{vaina} < 600°C y post-dryout < 60 seg.		
Presión en colector de salida	• < 11.9MPa(a), para SDS1, válvulas de alivio líquido disponibles.	Límites de sobrepresión	Frecuencia moderada

	<ul style="list-style-type: none"> • < 13.0MPa(a), para SP N². 	
--	---	--

De dichos criterios se han seleccionado dos de ellos a ser utilizados en el presente trabajo:

- Temperatura de fusión de vaina aproximadamente 1760°C.
- Temperatura de fusión del combustible aproximadamente 2840°C.

2.5. CASO DE ESTUDIO: ROTURA DEL 40 % EN UN COLECTOR DE ENTRADA

Se ha adoptado como evento de estudio un LOCA del 40% en el colector de entrada del canal O6 [14] [15] [16] .

El evento inicia con la rotura del 40% de un colector de entrada al reactor (RIH). El caudal de descarga de refrigerante por la rotura aumenta rápidamente en una fracción de segundo a un valor de 6500 kg/s, para luego disminuir debido al vaciado del sistema, caída de presión y el aumento de vapor en la descarga.

La presión en el colector roto y en los canales agua bajo disminuye rápidamente seguido de una despresurización del resto de los colectores del circuito roto.

En el circuito sano, se produce un aumento de la presión debido al pulso de potencia, lo que provoca la apertura de las válvulas de alivio líquido, que cierran a los pocos segundos debido a la disminución de la potencia.

La rotura provoca la generación de vapor en los canales combustibles aguas abajo de la rotura, por el efecto conjunto de despresurización, vaciado y evaporación.

Luego de la rotura se producen las señales de LOCA y aislación de circuitos, respectivamente. Las válvulas de inyección del sistema de alta presión del ECCS, comienzan a abrirse a medida que se cierran las válvulas de aislación de los circuitos. El circuito sano pierde inventario al circuito roto a través de la línea de conexión al presurizador, hasta que esta se cierra para aislar los circuitos.

Treinta segundos después de producirse la señal de LOCA se abren las válvulas de seguridad de los generadores de vapor, lo que generalmente se conoce como "Crash Cool-Down". Este mecanismo facilita la despresurización del circuito intacto del SPTC al disminuir la temperatura

de saturación del lado secundario de los GVs. La disminución de la presión del circuito roto es gobernada por la rotura.

La inyección del sistema de alta presión de ECCS (HPECCS) se produce a los 31 segundos cuando la presión del circuito roto cae por debajo de la presión de inyección del HPECCS, mientras que en el circuito sano la presión es superior a la de inyección del HPECCS. A los 48 segundos el caudal inyectado por el HPECCS supera al caudal que se fuga por la rotura produciéndose el inicio del rellenado del circuito roto. Posteriormente inicia la inyección de media presión MPECCS y luego de baja presión LPECCS

En el circuito sano se genera un flujo de refrigerante por termosifónado. El flujo de refrigerante en los canales combustibles, dependiendo de su ubicación, podrá darse en sentido normal o inverso. La remoción de calor en este circuito se realiza a través de los generadores de vapor y disminuye a medida que la temperatura del sistema primario se acerca a la del sistema secundario, dada la caída de la potencia producida por el reactor.

El circuito que posee la rotura se refrigera a largo plazo a través del ECCS de baja presión. El recorrido del refrigerante se completa con la salida de refrigerante por la rotura el cual fluye hacia el sumidero de la contención, para luego volver a ser inyectado al SPTC por las bombas del ECCS de baja presión.

2.6. VARIACION DE PARAMETROS Y SUS EFECTOS SOBRE LOS FENOMENOS

Parte fundamental del cálculo de incertezas es la selección de los parámetros que se variarán. Cada uno de ellos provocara la aparición o modificación de los fenómenos que ocurren en la simulación.

La variación de parámetros se realiza siguiendo un juicio de experto. Por ejemplo, en la referencia [17] hay listados un conjunto de variables que afectan a fenómenos críticos para este evento. Es decir, una que conceptualmente, se definen qué fenómenos son relevantes, se buscan qué parámetros afectan o modifican dichos fenómenos. A modo de ejemplo, el caudal de descarga a través de la rotura, y en consecuencia, el inventario remante en el núcleo, depende de la diferencia de presiones entre colectores y las pérdidas de carga concentradas y distribuidas. Siguiendo este razonamiento, en la Tabla 6 se listan los parámetros que fueron modificados, la localización dentro del sistema y el fenómeno en el cual impactan.

Tabla 6. Parámetros modificados y su impacto en los fenómenos producidos en el canal combustible durante un LOCA.

Sistema / Componente / Equipo	Fenómeno	Parámetro Modificado
Canal Combustible	Evaporación por despresurización (Flashing)	<ul style="list-style-type: none"> • Presión de los colectores • Coeficientes K de pérdida de carga • Rugosidad

	Caída de presión	<ul style="list-style-type: none"> • Caudal de refrigerante • Coeficientes K de pérdida de carga • Áreas de paso
	Flujo inverso	<ul style="list-style-type: none"> • Presión de los colectores • Coeficientes K de pérdida de carga • Rugosidad
	Transferencia de calor por convección	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia • Presión de los colectores • Coeficientes K de pérdida de carga • Conductividad del Gap
	Deformación	<ul style="list-style-type: none"> • Área del canal combustible
Elemento Combustible	Conductividad del GAP	<ul style="list-style-type: none"> • Variación de la conductividad • Potencia
	Ebullición en película	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia • Coeficientes K de pérdida de carga • Conductividad del Gap • Temp. Film
	CHF	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia • presión de los colectores • Coeficientes K de pérdida de carga
	Calor de decaimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia
	Régimen de flujo	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia • presión de los colectores • Factor de forma (form loss)
	Generación de vapor por calentamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia • Conductividad del gap
	Flashing	<ul style="list-style-type: none"> • presión de los colectores • Factor de forma (form loss)
	Flujo multifasico	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia • presión de los colectores • Factor de forma (form loss) • Coeficientes K de pérdida de carga
	Caída de presión	<ul style="list-style-type: none"> • Factor de forma (form loss) • Coeficientes K de pérdida de carga
	Flujo inverso	<ul style="list-style-type: none"> • Presión de los colectores
SPTC (los equipos del SPTC considerados son los que se	Flujo Critico	<ul style="list-style-type: none"> • presión de los colectores • área de los feeders

encuentran entren los colectores HDR6 y HDR7)		<ul style="list-style-type: none"> • K de los feeders • K del canal
	Régimen de flujo	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia • presión de los colectores • Factor de forma (form loss) • Coeficientes K de pérdida de carga
	Flujo natural	<ul style="list-style-type: none"> • presión de los colectores • Factor de forma (form loss) • Coeficientes K de pérdida de carga
	Flujo inverso	<ul style="list-style-type: none"> • presión de los colectores
Feeders	Flashing	<ul style="list-style-type: none"> • Presión de los colectores
	Régimen de flujo	<ul style="list-style-type: none"> • Presión de los colectores • Factor de forma (form loss) • Coeficientes K de pérdida de carga
	Caída de presión	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficientes K de pérdida de carga de los feeders
	Flujo inverso	<ul style="list-style-type: none"> • Presión de los colectores
SP N ^o 1 y N ^o 2	Efecto de la reactividad en el disparo	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia • Presión de los colectores

2.7. DESCRIPCIÓN DEL TRACE5 PATCH 4

El TRACE5 es un código termohidráulico generado por la US-NRC ("United State - Nuclear Regulatory Commission") diseñado para realizar análisis de mejor estimación ("Best Estimate") de LOCA, transitorios operacionales y otros escenarios en reactores de agua presurizada del tipo PWR y BWR, entre otros.

El TRACE5 puede ser utilizado por línea de comando o en conjunto a la plataforma SNAP (Symbolic Nuclear Analysis Package) [18] lo cual facilita la realización de modelos. En la Figura 8 se presenta la interfaz del TRACE5:

- Encuadre Naranja: Navegador, allí se listan los distintos componentes que provee el TRACE5 para la realización de los modelos, las opciones de cálculo y selección de correlaciones, el tiempo de cálculo y el paso de tiempo, etc.
- Encuadre Rojo: Vista, en esta ventana es donde serán representados los componentes hidráulicos, sistemas de control, etc.
- Encuadre Verde: Mensajes, tiene como función dar información al usuario, por ejemplo: advertencias de errores en el modelo que se está elaborando, cuando se ejecuta un modelo, cuando se abre un archivo, etc.
- Encuadre Azul: Propiedades Principales, en este menú figuran las opciones del componente en el cual se ha cliqueado en la Vista (encuadre rojo) o en el Navegador (encuadre naranja).

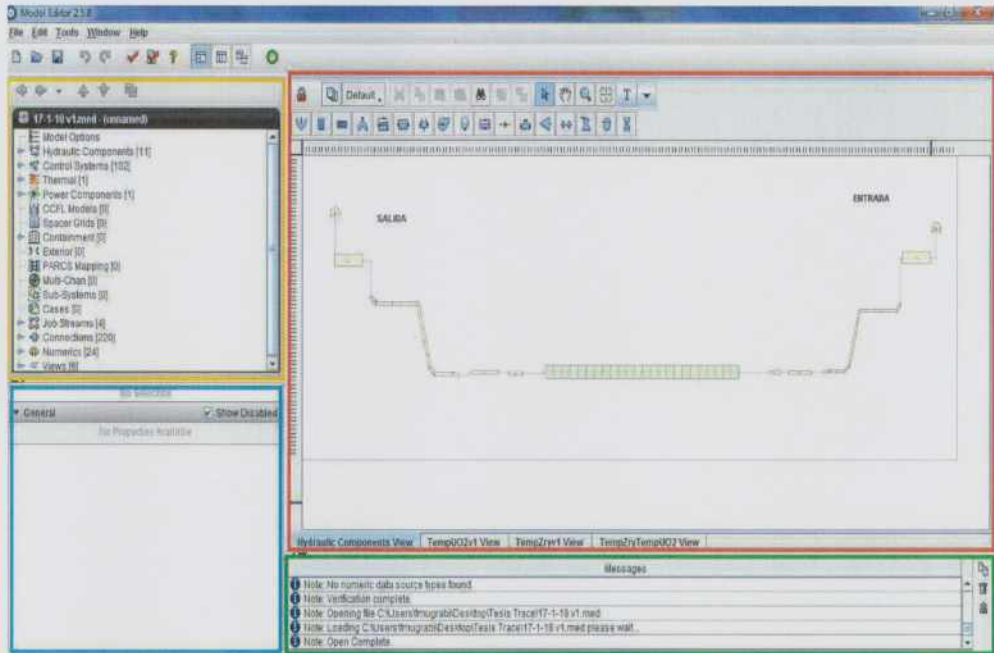


Figura 8. Interfaz del TRACE5 utilizando el SNAP

El código de sistemas TRACE5 utiliza un modelo hidrodinámico de dos fluidos, líquido y vapor/gas, totalizando un total de 6 ecuaciones de conservación: masa, energía y cantidad de movimiento. Se agrega, cuando corresponde, una séptima ecuación que describe la evolución de no condensables; y una más para la evolución de un soluto (por ejemplo ácido bórico). Al sistema de ecuaciones anteriores, se agregan las relaciones constitutivas, ecuaciones de estado y de transferencia de calor.

Las ecuaciones diferenciales, en derivadas parciales, que describen la conservaciones de masa, energía y cantidad de movimiento, y la transferencia de calor de las dos fases son resueltas utilizando métodos numéricos de volúmenes finitos. El código dispone de dos métodos de resolución:

- Semi implícito: el método lleva a cabo un cálculo por pasos. En el primer paso se evalúan las propiedades y variables al inicio del paso del tiempo para luego utilizarlas en la resolución de las ecuaciones por medio de diferencias finitas. Los resultados obtenidos son tomados por el siguiente volumen de control como datos de entrada, y se repite el esquema de cálculo hasta completar la totalidad de las celdas.
- SETS es un método semi-implícito. Este es análogo al anterior con pequeñas variaciones.

Ambos pueden utilizarse con métodos diferenciales de primer o segundo orden. Más detalles de los mismos puede encontrarse en [19], [20] y [21].

El TRACE5 es un código modular donde los distintos sistemas de una central son modelados mediante un conjunto componentes que representan los distintos equipos, como por ejemplo:

cañerías ("pipes"), presurizador ("prizers"), turbinas ("turbs"), etc. Cada uno de estos componentes es nodalizado en una serie de volúmenes de control (celdas) en las cuales las propiedades resultan de un promedio ponderado con el volumen o área según corresponda.

La concepción modular del código permite generar componentes independientes entre sí. Esto permite la modificación de uno de ellos sin que esto modifique al resto de los componentes.

La transferencia de calor es realizada mediante un componente denominado estructura de calor (HS: "heat structure") el cual es utilizado para modelar elementos combustibles o paredes con calentamiento, enfriamiento en convección forzada o natural. Estas superficies pueden ser planas, cilíndricas o esféricas.

La potencia a los elementos combustibles se implementa en el TRACE5 con un componente denominado "POWER". En este componente, que se combina con las estructuras de calor, se especifica el perfil de potencia y cómo es controlada la potencia entregada. A su vez se puede vincular este componente con un módulo de cinética puntual o espacial a través del PARCS.

El código de sistemas, dado que resuelve un conjunto de ecuaciones diferenciales, requiere de condiciones iniciales para todos los componentes utilizados, y de la definición de condiciones de borde y de contorno en los componentes que correspondan.

El TRACE5 se ejecuta por una serie ordenada de etapas. Esta serie de etapas es la que se muestra en la Figura 9. Estas pueden ser sencillas o complejas según la necesidad del usuario. La configuración más sencilla parte desde la entrada de datos "INPUT", el cual se conoce dentro del SNAP como "BASE MODEL" donde se encuentra la información del modelo, datos geométricos, número de componentes, etc. Luego se encuentra una etapa de ejecución, el cual toma la información del "INPUT" y realiza la "corrida". En esta etapa se puede elegir el método de cálculo, el paso de tiempo, etc.

El paso de tiempo está definido por dos valores extremos, un mínimo y un máximo. Definido este rango de paso de tiempo, el programa, según la necesidad en el cálculo variara el valor del paso de tiempo utilizado para el cálculo a fin de que este converja.



Figura 9. Etapas de cálculo utilizado por el TRACE5.

El tiempo de cálculo es dependiente de varios factores, entre ellos:

- El número de celdas presentes en los componentes. El manual del software [21] sugiere una relación, para las tuberías, L/D (longitud/diámetro) con un valor entre 4 y 5. Cabe agregar que este cociente depende del problema físico a estudiar.
- El paso de tiempo elegido (timestep data). Al disminuir su valor, el tiempo de cálculo aumenta. El valor elegido debe ser tal de poder representar los fenómenos que se espera encontrar en el modelo.

2.8. DESCRIPCIÓN DEL CODIGO DAKOTA

El programa TRACE5 en el entorno SNAP permite la utilización de una aplicación (plug-in), llamado DAKOTA [22], [23] y [24]. Este contiene un conjunto de métodos iterativos y meta-algoritmos que interactúa con el TRACE5 (en este caso TRACE5, también es posible utilizarlo con RELAP5) permitiendo realizar análisis paramétricos y cuantificar márgenes e incertezas, análisis de riesgos, calibración de modelos, etc.

En líneas generales, el DAKOTA permite realizar:

- Estudios paramétricos: estos se utilizan en diseño para conocer el efecto de cambios de los parámetros utilizados dentro de los modelos, generando un análisis de sensibilidad. Estos permiten evaluar las características de la simulación tales como suavidad, robustez y no linealidad.
- Diseño de experimentos: se utilizan para determinar los parámetros de un problema de diseño de ingeniería, por ejemplo para realizar análisis de sensibilidad global.
- Cuantificación de la incertidumbre: se utiliza para calcular la variación de los resultados propagando la incertidumbre que se tiene en los datos de entrada de la simulación (los enfoques comunes incluyen muestreo por el método de Monte-Carlo y LHS),

El plug-in DAKOTA emplea un método para calcular tamaños de muestra basada en el método de Wilks (ver sección 2.1).

La interfaz gráfica del DAKOTA consta de un menú principal (ver Figura 10), el cual posee 4 ventanas:

- Propiedades: en esta ventana se define el número de cálculos a realizar, el método de generación de los valores (Montecarlo o LHS), la probabilidad y confianza y las figuras de mérito.
- VARIABLES: se seleccionan los parámetros y la distribución probabilística con la cual varían.
- Distribuciones: se generan las distribuciones probabilísticas que son utilizadas en la pestaña anterior, Variables.
- Reporte: se le da el formato deseado al reporte y los gráficos que se generaran en el mismo.

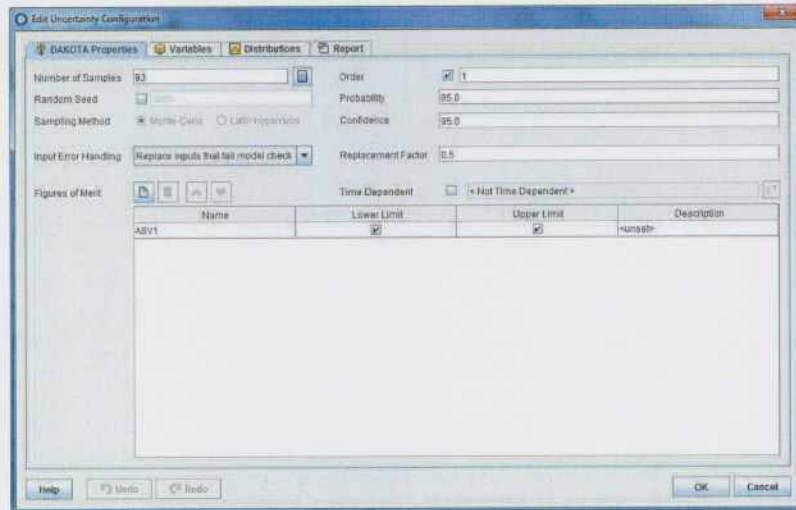


Figura 10. Menú principal del DAKOTA utilizando el SNAP.

El proceso de cálculo que requiere el TRACE5 y el DAKOTA para el cálculo de incertezas presenta una complejidad mayor que el utilizado para un cálculo tradicional de TRACE5, como el que se muestra en Figura 9. Este requiere de dos etapas adicionales, como se observa en la Figura 11.

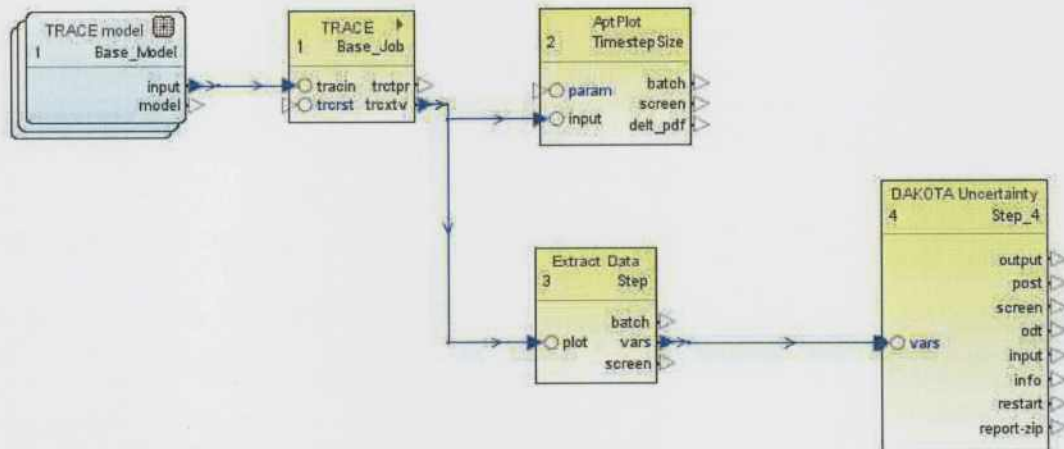


Figura 11. Etapas de cálculo utilizado por el TRACE5 para el cálculo de incertezas.

La primer etapa adicional es la de "EXTRACT DATA", la cual tiene como función asignarle a la figura de mérito una determinada variable, en nuestro caso estas serán la temperatura de combustible y la temperatura de vaina. La figura de mérito (también llamada "función respuesta") está definida como un valor escalar el cual es calculado en cada corrida del código. El análisis de incertezas que lleva a cabo el DAKOTA está orientado a analizar y relacionar los valores de la figura de mérito con los parámetros que presentan incertezas y se hace variar aleatoriamente.

En la Figura 11 se representa el diagrama de flujo del método, y una comparación a un cálculo realizado sin análisis de incertezas.

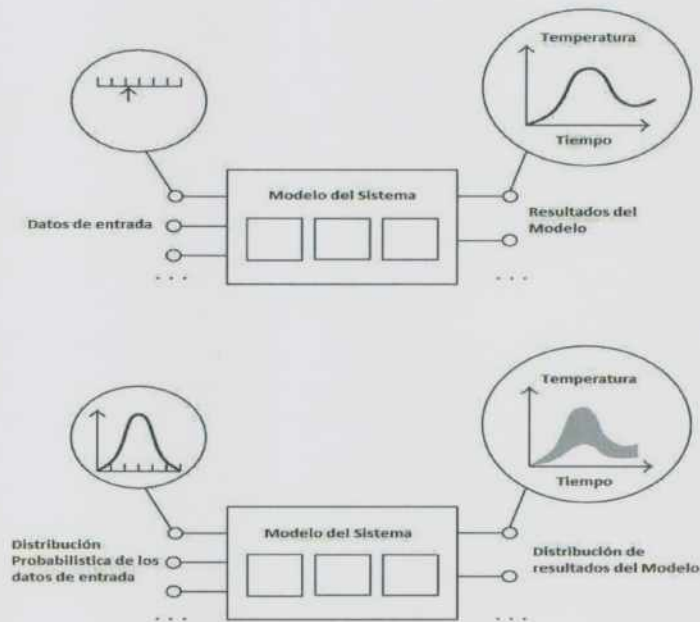


Figura 12. Resultados de un modelo sin cálculo de incertezas y con cálculo de incertezas

Para definir la figura de mérito en el programa se debe introducir una línea de comando indicando dicha relación, la cual también definirá si se desea el valor mínimo, máximo u otro. En este caso se desea el valor máximo de la temperatura, siendo la línea de comando a introducir la siguiente:

CALC "ASV1 = maxYval(T0_cb450)"

Dicha línea de comando define a la figura de mérito, nombrada como ASV1, como el valor máximo de todas las temperaturas de todas las celdas del bloque de control llamado "cb450".

La segunda etapa adicional de cálculo, DAKOTA UNCERTAINTY, toma los valores extraídos en la etapa anterior y realiza los cálculos estadísticos y genera el reporte definido en el menú principal del DAKOTA. El informe (extensión ".ODF") detalla el análisis de incertezas realizado. Los informes proporcionan un resumen de todo el análisis, documentando la entrada de datos al DAKOTA (figuras de mérito, probabilidad y confianza elegida, distribuciones probabilísticas, parámetros a variar, etc.), los resultados de ejecución del código de análisis y los resultados de incertidumbre y sensibilidad.

2.8.1. CÁLCULO DE CORRELACIONES

Como se mencionó con anterioridad, el método elaborado por el GRS [25] incluye un análisis de sensibilidad, que a diferencia de otros métodos estadísticos, se basa en el análisis y no en hipótesis o preconceptos, disminuyendo de esta forma la posibilidad de descartar parámetros que se suponen irrelevantes para el análisis y que en verdad no lo son.

Existen diversas medidas numéricas para cuantificar la dependencia entre dos pares de observaciones. Una de las más difundidas es la correlación de Spearman. Esta evalúa el ajuste de dos variables por medio de una función monótona, creciente o decreciente, como se observa en la Figura 13. .

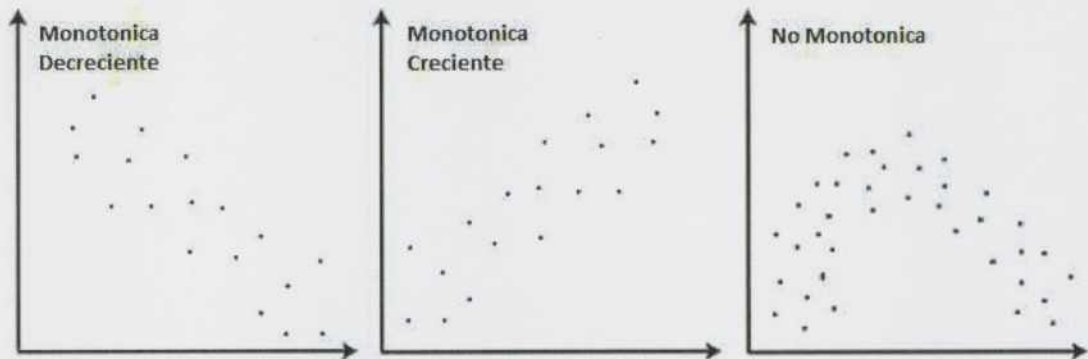


Figura 13. Representación gráfica de pares de observaciones.

Si los pares de variables (X e Y) ajustan de forma perfecta con una función monótona creciente (decreciente) el coeficiente de Spearman tendrá un valor de 1 (-1). Esto indica que al aumentar (decrecer) X, la variable Y aumenta (decrece). Un valor de cero indica ausencia completa de una relación entre las dos variables. Este coeficiente es calculado con la siguiente formula:

$$\rho = 1 - \frac{6 \times \sum D^2}{N \times (N^2 - 1)} \quad (3)$$

Siendo,

ρ = Coeficiente de Spearman

D = diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden de X - Y

N = número de parejas de datos

CAPITULO 3

MODELADO Y SIMULACIÓN

3.1. MODELADO DEL CANAL COMBUSTIBLE EN TRACES

Como ya se ha mencionado en el Capítulo 2, el modelado de un canal combustible se realiza desde los colectores siguiendo por los alimentadores, los "end fittings", acoples y el canal propiamente dicho, de la manera que se observa en la Figura 14.



Figura 14. Representación gráfica del modelo del canal combustible de la CNE

Para el modelo se consideró que:

- La rugosidad nominal de las cañerías y componentes es de 10 micrones, y la geometría y factores de pérdida de carga fueron obtenidos de [26].
- Las condiciones de contorno, los datos geométricos detallados (volumen, área, diámetro hidráulico, orientación espacial, etc.) y los coeficientes de pérdida de carga de todos los componentes del modelo pueden encontrarse en el Apéndice del presente trabajo y se obtuvieron de [27].

El componente "Break 1003" es el encargado de imponer las condiciones de contorno al colector de entrada. Como condición de contorno los colectores (obtenidos de referencia) definiendo presión, temperatura de líquido, temperatura de vapor y fracción de vacío, para cada uno de ellos durante los 20 segundos

El colector de entrada (HDR6) fue modelado mediante el componente "Pipe" 1010, contando con un único volumen de control horizontal. Este posee dos conexiones, a la entrada con el componente Break 1003 y a la salida con el alimentador de entrada ("Feeder").

El componente "Pipe 1011" es el encargado de modelar el "feeder" de entrada del canal, este posee 15 celdas con distintas orientaciones a fin de asemejarse lo más posible a los cambios de dirección que presenta el alimentador real.

El "feeder" se conecta al "End Fitting" de entrada, el cual es modelado por el componente "Pipe 1012". Este posee dos celdas y está orientado de forma horizontal.

La conexión entre el "end fitting" y el canal combustible está dado por un acople, modelado por el componente "Pipe 1013". Este posee una sola celda, y un área de flujo diferente en cada uno de sus extremos. La unión con el canal presenta la misma área que este.

El canal combustible está representado por el "Pipe 1100" el cual consta de 24 celdas. Este posee 12 EECC, y cada uno de ellos es representado por dos celdas. Los coeficientes de pérdida de carga concentrada a lo largo del canal tienen como objetivo representar la caída de presión que se produce por el cambio de área al finalizar un EECC y comenzar el otro.

La potencia generada en el canal por los EECC y la transferencia de esta al fluido refrigerante es llevada a cabo por dos componentes del código TRACE5: una estructura de calor ("Heat Structure") y una potencia ("Power"). El componente "Power" define el valor y perfil de potencia que presentará el elemento combustible. La estructura de calor es la encargada de realizar la transferencia de calor. El elemento combustible modelado contempla al material combustible (UO_2 natural) el cual posee 5 nodos radiales del mismo espesor, el gap de gas (He) que posee un solo nodo radial y la vaina (Zircaloy) que cuenta con 3 nodos del mismo espesor. A su vez la estructura de calor también es dividida en celdas axiales, la cuenta con 24 volúmenes de control, al igual que el "Pipe 1100". En el Apéndice, se definen las características más relevantes de la estructura de calor y del componente de potencia.

La salida del canal está conectada a un acople, modelado por el componente "Pipe 1016" de una sola celda. Este une el canal combustible al "End fitting" de salida, representado por el "Pipe 1017" compuesto por 2 celdas.

La salida del "Pipe 1017" se conecta al alimentador de salida, modelado por el "Pipe 1018". Al igual que el alimentador de entrada, este presenta 15 celdas con distinta orientación, a fin de representar los cambios de dirección que presenta la tubería. Como se observa en la Figura 14 este es simétrico al alimentador de entrada.

El alimentador de salida, se conecta al "Pipe 1018", que modela al colector de salida (HDR 7), este está orientado de forma horizontal con una sola celda.

Por último, el componente "break 1002" es el encargado de imponer las condiciones de contorno al colector de salida.

Todos los componentes del modelo requieren de un estado termodinámico inicial, que implica definir presión, temperatura de líquido, temperatura de vapor y fracción de vacío. Para ello se simuló un estado de plena potencia de la planta con los valores nominales de operación (los cuales pueden hallarse en el Apéndice) hasta alcanzar un estado estacionario de los parámetros.

El LOCA del 40% partirá de considerar a la planta operando a plena potencia con una potencia del canal combustible de 6.8 MW. La rotura se dará a los 0.0 segundos de comenzada la simulación, y la evolución estará determinada por las condiciones termodinámicas que le imponen los componentes "Break" al canal y por la excursión de potencia dada por el componente Power (ver la Tabla Anexo 5).

3.2. PRUEBAS DE ESTADO ESTACIONARIO

El LOCA ocurre con la planta operando en un estado estacionario a plena potencia. Para llevar a cabo la simulación del evento, previamente se debe verificar que el modelo alcanza el estado estacionario.

Dado que las condiciones de contorno impuestas implican definir temperatura de líquido, temperatura de vapor, fracción de vacío y presión de los colectores, para definir si el canal modelado se ajusta a los valores operativos se comparará el caudal circulante por el canal con datos conocidos.

La ARN, en [26], ha modelado en RELAP5 un canal combustible de la CNE, específicamente el S8. A este canal se le ha asignado una potencia de 6.46 MW, obteniendo para dicha potencia un caudal circulante de 22.7 kg/s.

Al canal modelado en el presente trabajo se le ha asignado una potencia de 6.8MW, el cual se lo considera como el caso de referencia. Para esta potencia el caudal circulante es de 24.4 kg/s. Se ha realizado un cálculo del caudal circulante con la potencia máxima permitida para el canal O6, 7.3 MW. Para esta potencia el caudal de refrigerante es de 23.2 kg/s, como se observa en la Figura 15. Se considera que los valores de caudal obtenidos son representativos de un estado estacionario de la CNE para condiciones nominales o sobrepotencia.

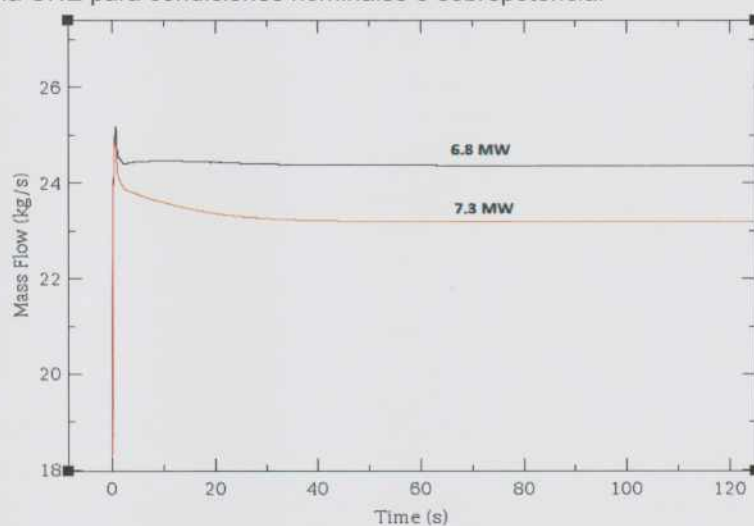


Figura 15. Caudal del canal combustible O6 para una potencia de canal de 6.8 MW y de 7.3 MW.

3.3. CORRIDAS DE LOS TRANSITORIOS Y EL CASO DE REFERENCIA

El cálculo de incertezas realizado con el software DAKOTA implica la generación de múltiples cálculos, en cada uno de ellos los distintos parámetros elegidos varían según la función probabilística definida con anterioridad.

Previo al análisis de incertezas se realizó un cálculo sin ninguna variación de los parámetros, el cual se lo denominará caso de referencia. Esto se realiza a fin de establecer la respuesta del modelo para el caso de referencia, es decir un cálculo "Best Estimate".

En la Figura 16 se observa la evolución de la temperatura de vaina y de la temperatura del combustible durante los 20 segundos que fue simulado el LOCA. La despresurización y disminución del caudal circulante en el canal (ver Figura 17 y Figura 18) produce el aumento de la temperatura y la vaporización del fluido por "Flashing". En un tiempo aproximado de 2.0 s después de generada la rotura se produce un máximo en la temperatura de la vaina de 612°C y un máximo en la temperatura del combustible de 1613 °C.

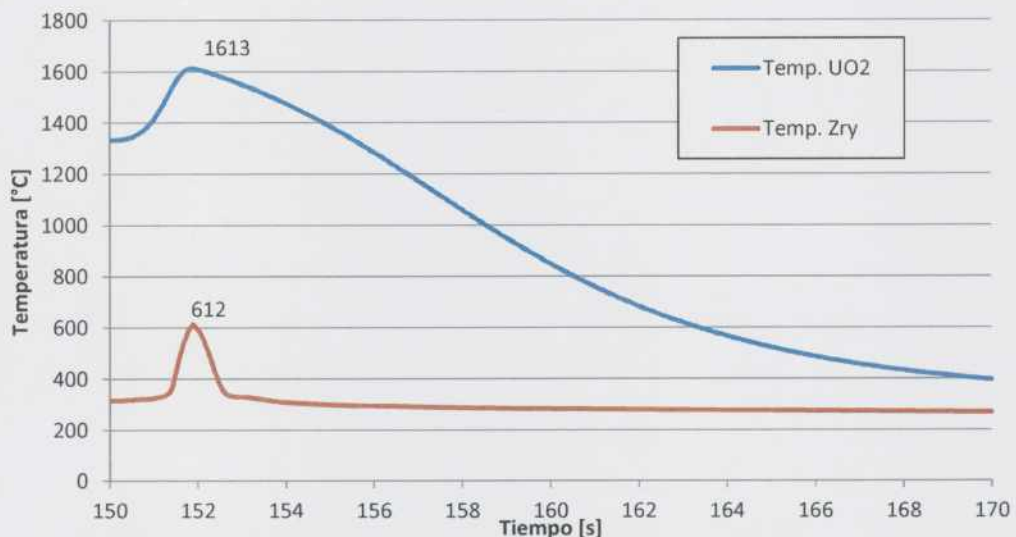


Figura 16. Temperatura de combustible y de vaina para un LOCA en condiciones nominales.

3.4. COMPARACIONES CON OTROS CODIGOS

La ARN ha elaborado dos modelos de la CNE en RELAP5. Un modelo completo de la instalación que comprende varios de los sistemas considerados como principales de la instalación (sistema de vapor, sistema de agua de alimentación, sistema primario, ECCS, etc.) y es utilizado para simular transitorios de los eventos accidentales [25]. Un segundo modelo desarrollado comprende solo un canal combustible, considerando todo los componentes entre los dos colectores, análogo al del presente trabajo [26].

Se dispone de los resultados de una corrida del modelo del canal combustible desarrollado por la ARN en RELAP5, y se ha comparado con los resultados del caso BE simulado en TRACE5.

En ambos casos se consideró un estado estacionario inicial de 150 segundos, a fin de estabilizar los parámetros. Las presiones utilizadas como condición de contorno en el modelo en TRACE5 fueron obtenidas del modelo elaborado por la ARN, por lo tanto estas no se compararon.

El caudal total (líquido y vapor) circulante por el canal, presenta gran similitud entre los dos modelos. El modelo elaborado en trace presenta una inversión de flujo a la entrada del canal al comienzo del evento LOCA, el cual no se observó en el modelo en RELAP5. Según se ilustran en la Figura 17 y la Figura 18.

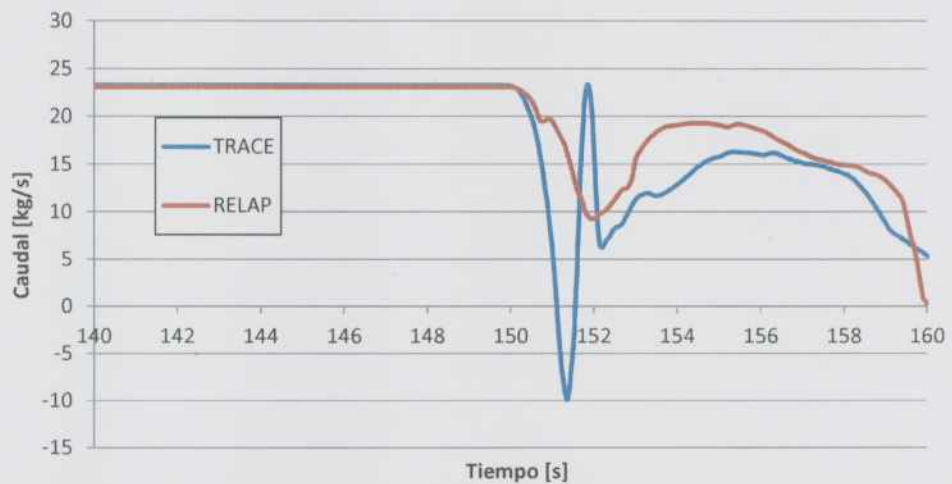


Figura 17. Evolución temporal del caudal másico en la entrada del canal O6 en un LOCA para el modelo elaborado en RELAP5 y en TRACE5.

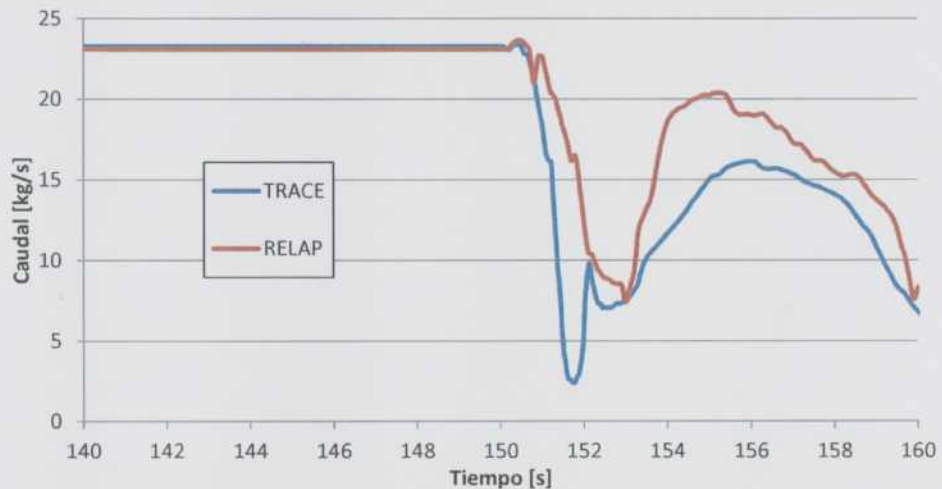


Figura 18. Evolución temporal del caudal másico en la salida del canal O6 durante el evento LOCA para el modelo elaborado en RELAP5 y en TRACE5.

CAPITULO 4

FIGURA DE MERITO Y ESTIMACION DE INCERTEZAS

De los criterios de aceptación que se listan en la Tabla 5, se han seleccionado dos de ellos como parámetro para la evaluación de las incertezas:

- Temperatura de fusión de vaina aproximadamente 1760°C.
- Temperatura de fusión del combustible aproximadamente 2840°C.

Dichos criterios limitan la temperatura máxima que puede alcanzar la vaina de Zircaloy y el combustible de UO₂. Dado que las temperaturas deben ser menores a fin de cumplir con los criterios de aceptación, solo importara el extremo derecho de la distribución de temperaturas.

Se ha seleccionado un 95% de nivel de confianza y un 95% de probabilidad, lo que implica según Wilks un número de 93 (segundo orden) cálculos a realizar para cada uno de los criterios de aceptación elegidos. Esto, en otras palabras, expresa que se tiene un 95% de probabilidad de que al menos el 95% de los casos cumplan con márgenes de seguridad [28] y [29]. Cada uno de los criterios de aceptación será evaluado en corridas independientes.

La forma de aplicación elegida de las distribuciones hacia los parámetros es la definida como "Factor" en el DAKOTA (hay diversas opciones para aplicar las distribuciones como son: reemplazo del valor nominal, adición al valor nominal, etc.). Esta opción multiplica el valor generado según la distribución seleccionada por el valor nominal de la variable definida en cada componente del modelo.

Los tipos de distribución elegidas son del tipo:

- normal, definida por el valor central " μ " y la desviación " σ "
- uniforme, definida por el valor inferior, "a" y el valor superior, "b".

Los rangos de variabilidad elegidos, como así también el tipo de distribución, son propios de cada uno de los parámetros que se hará variar en las corridas del código.

En [30] se indica que los parámetros que describen la condición operativa de la planta, como por ejemplo: potencia inicial, tolerancias de fabricación, etc. sus incertezas deben ser provistas por la experiencia operativa de la planta y por los proveedores.

Para la variación en la potencia del núcleo se ha considerado que los valores se encuentren entre la potencia nominal para el canal O6 a plena potencia (6.8 MW) y el máximo valor permitido para este (7.3 MW).

Los rangos de variabilidad de los parámetros han sido adoptados de la referencia [30] y para los parámetros que no se ha encontrado un valor sugerido de variabilidad en la bibliografía, se ha considerado una variación de $\pm 10\%$, según la recomendación dada en [31].

En la Tabla 7 se listan los parámetros elegidos, las distribuciones probabilísticas que siguen, la forma de aplicación, los parámetros de la distribución, la variable y su valor nominal [8].

Tabla 7. Parámetros que variarían en el cálculo de incertezas y su distribución probabilística.

Nombre de la parámetro	Tipo de distribución	Forma de aplicación	Parámetros de la distribución	Nombre de la variable en el Modelo	Valor Nominal
Rugosidad	Uniforme	Factor	a:0.2, b:6.0	Rugosidad	1.0E-5
Conductividad del gap de gas	Uniforme	Factor	a:0.2, b:1.8	gapCondSV [1016]	1.0
Coefficiente de transferencia de calor.	Uniforme	Factor	a:0.871, b:1.129	nuclHTCWallSV [1013]	1.0
Coefficiente de transferencia de calor subenfriado	Uniforme	Factor	a:0.9, b:1.1	subcHTCWallSV [1012]	1.0
Flujo crítico de calor ("Critical Heat Flux").	Uniforme	Factor	a:0.675, b:1.325	CHF	1.0
Presión del gas.	Uniforme	Factor	a:0.9, b:1.1	PressureGap	1.0E6
Potencia	Uniforme	Factor	a:0.94, b: 1.07353	ReactivityScaleFactor	1.0
Densidad del combustible	Normal	Factor	μ :1.0, σ :0.025, [0.92, 1.0]	FuelDensity	1.0
Temperatura del film	Uniforme	Factor	a:0.9, b:1.1	tMINWallSV [1010]	1.0
Presión en el colector de salida ("Break1002")	Uniforme	Factor	a:0.95, b:1.05	Break 1002 [ptb] (124 rows)	1.0
Fracción de vacío en el colector de entrada "Break 1003"	Uniforme	Factor	a:0.95, b:1.05	Break 1003 [alptb] (124 rows)	1.0
Arrastre	Uniforme	Factor	a:0.5, b:1.5	bubIntfDragSV [1024]	1.0
				drplIntfDragSV [1027]	1.0
				rodBIntfDragSV [1028]	1.0

Nombre de la parámetro	Tipo de distribución	Forma de aplicación	Parámetros de la distribución	Nombre de la variable en el Modelo	Valor Nominal
				bSlgVslntDragSV [1029]	1.0
				aMstVslntDragSV [1030]	1.0
				dFFBIntDragSV [1031]	1.0
				iSlgIntDragSV [1032]	1.0
				iAFBIntDragSV [1033]	1.0
Arrastre de la pared	Uniforme	Factor	a:0.9, b:1.1	wallDragSV [1022]	1.0
Factor de forma	Uniforme	Factor	a:0.8, b:1.2	formLossSV [1023]	1.0
Coeficiente de pérdida de carga K del canal	Uniforme	Factor	a:0.9, b:1.1	kCanal098	0.98
				kCanal0415	0.415
Área del Canal	Uniforme	Factor	a:0.99854, b:1.0146	AreaCanal	3.425407E-3
Área de los "Feeders"	Uniforme	Factor	a:0.9, b:1.1	AreaFeedersentrada	2.73436E-3
				AreaFeederssalida	5.7342E-3
Coeficiente de pérdida de carga K de los alimentadores	Uniforme	Factor	a:0.9, b:1.1	Kfeeder032	0.32
				Kfeeder031	0.31
				Kfeeder033	0.33
				Kfeeder064	0.64
				Kfeeder131	1.31
				Kfeeder035	0.35
				Kfeeder069	0.69
				Kfeeder036	0.36
Coeficiente de transferencia de calor film boiling	Uniforme	Factor	a:0.9, b:1.1	transLIHTCSV [1002]	1.0
Coeficiente de pérdida de carga K de los "End Fittings"	Uniforme	Factor	a:0.9, b:1.1	Kfeeder05	0.5

4.1. SUPERFICIE DE RESPUESTA

Se han realizado 93 "corridos" independientes para cada uno de los criterios de aceptación adoptados.

Los resultados de los cálculos se encuentran detallados en el Apéndice, mientras que en la Tabla 8 y la Tabla 9 se ha elaborado un resumen de los resultados para la temperatura de combustible y la temperatura de vaina, respectivamente.

En la Figura 19 y Figura 23 se representan gráficamente los valores de la Tabla 8 y la Tabla 9, respectivamente.

Tabla 8. Temperatura de combustible para los 93 cálculos realizados por el DAKOTA.

Parámetro	Valor [°C]	Nº de corrida
Valor Mínimo	1467.7	40
Valor Máximo	1882.2	61
Promedio	1646.8	-
Mediana	1645.9	89
Mejor Estimación	1613.2	
Desviación Estándar	95.8	-

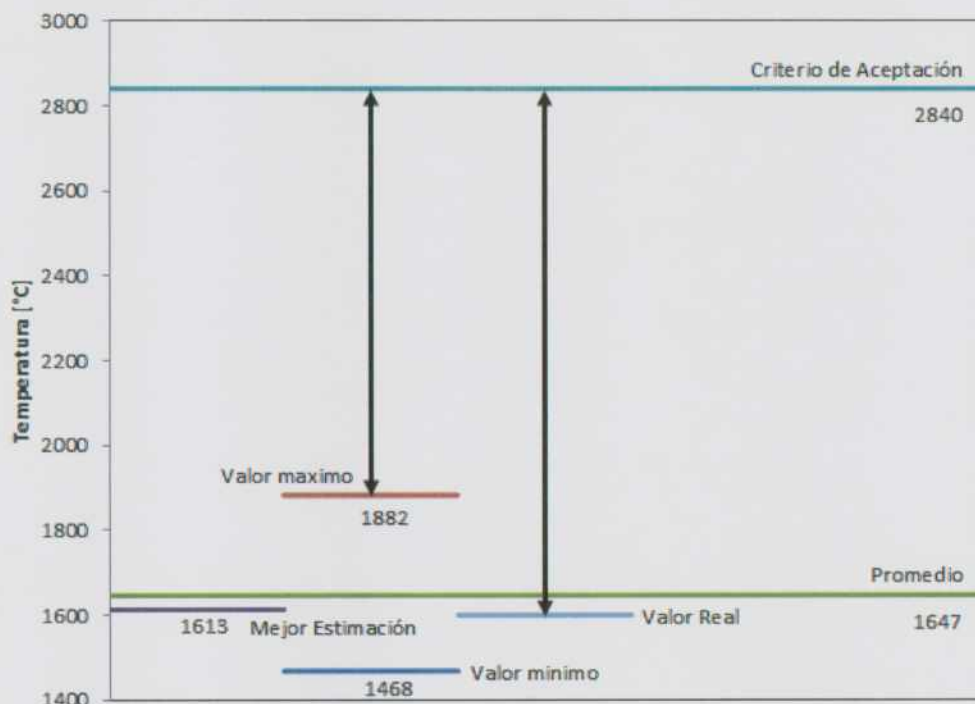


Figura 19. Representación gráfica de las temperaturas de combustible obtenidas de las 93 corridas de TRACE con el valor del criterio de aceptación.

En la Figura 20 se observa la evolución temporal de la temperatura del combustible para el caso BE y para el cálculo con incertezas. Ambas curvas, el caso BE y el caso de máximo valor con incertezas, son similares en su forma con un valor superior la última de ellas. Se observa que la posición donde ocurre el máximo valor de temperatura es similar en ambos casos, para luego descender.

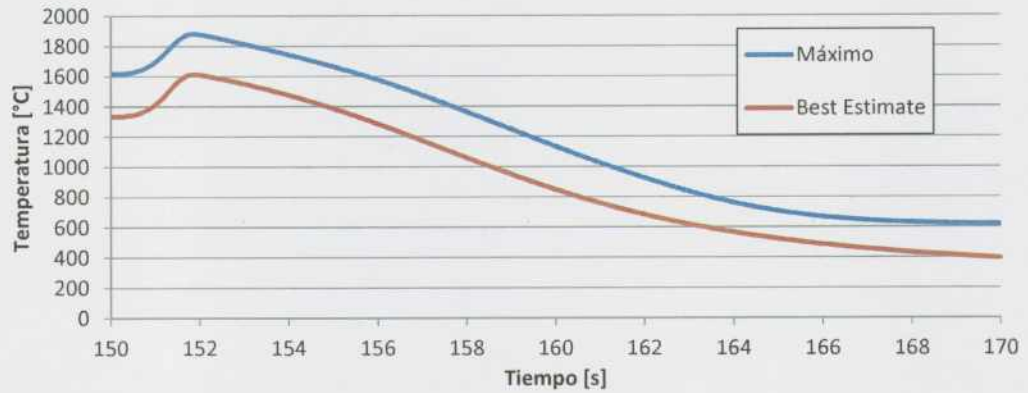


Figura 20. Temperatura de combustible para el máximo valor con incertezas y el caso BE para un LOCA.

Haciendo uso del reporte elaborado por el DAKOTA, se concluye que los factores que más impactan en la temperatura de combustible, según un coeficiente de Spearman, son:

- En mayor medida, la potencia y la densidad del combustible
- En menor medida, los coeficientes K de pérdida de carga del canal y el área de los alimentadores

Para el caso de la potencia el coeficiente da un valor de 0.70 como puede observarse en la Figura 21. Mientras que para la densidad de combustible el valor del coeficiente es de -0.55, como puede observarse en la Figura 22.

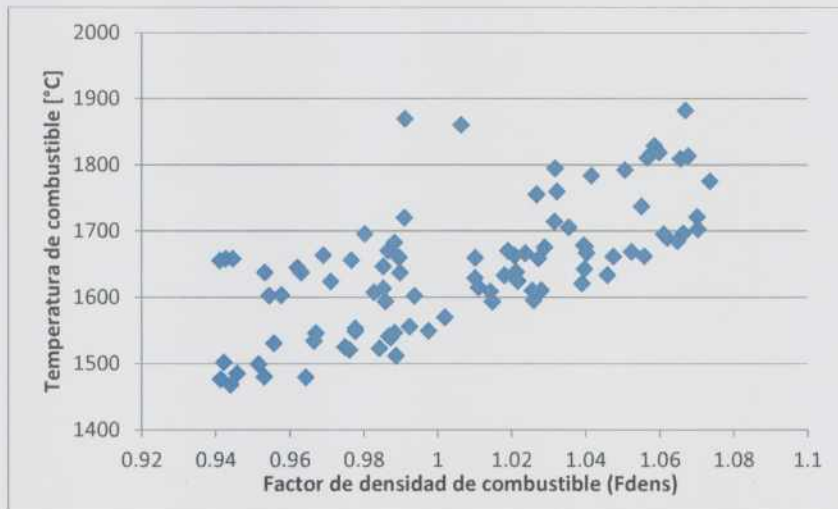


Figura 21. Temperatura de combustible en función del factor de potencia.

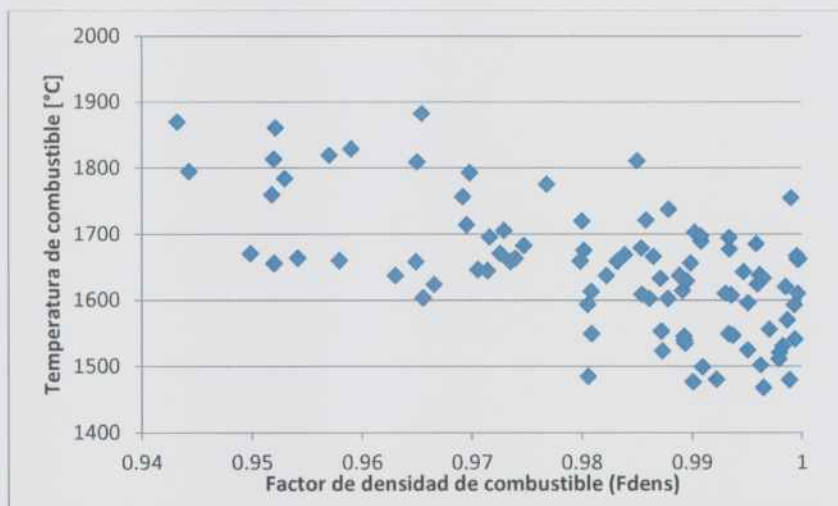


Figura 22. Temperatura de combustible en función del factor de densidad de combustible.

Realizando el mismo tratamiento de datos pero para la temperatura de vaina se obtienen los valores de la

que resumen las 93 corridas realizadas. En la Figura 24 se observa la evolución temporal de la temperatura de la vaina para el caso BE y para el cálculo con incertezas que presenta el máximo valor.

Tabla 9. Temperatura de vaina para los 93 cálculos realizados por el DAKOTA.

Parámetro	Valor [°C]	Nº de corrida
Valor Mínimo	346.21	12
Valor Máximo	788.05	74

Promedio	593.71	-
Mediana	595.97	21
Mejor Estimación	612.38	-
Desviación Estándar	78.72	-

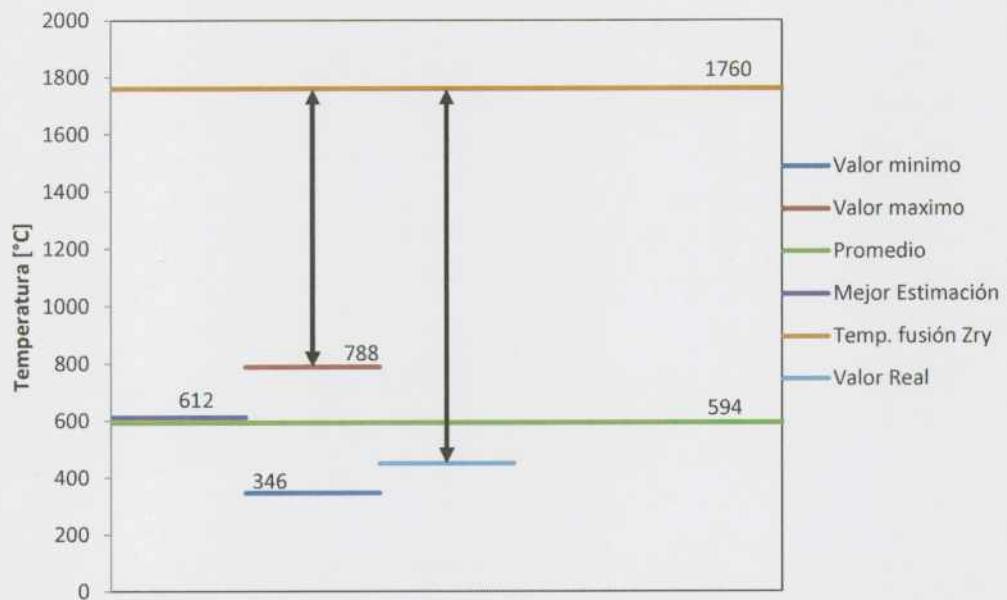


Figura 23. Representación gráfica de las temperaturas de vaina obtenidas de las 93 corridas de TRACE con los valores del criterio de aceptación y temperatura de fusión del Zircaloy.

En la Figura 25 se observa la evolución temporal de la temperatura de la vaina del EC para el caso BE y para el cálculo con incertezas. La temperatura de la vaina combustible, en el caso BE y en el caso con incertezas, presentan un comportamiento distinto. En el caso BE, a los 2 dos segundos de generada la rotura se produce un máximo en la temperatura de la vaina, tendiendo luego a valores menores a los 300°C. En la curva que e representa el caso con incertezas, se produce un pico de temperatura en la mismo instante que en el caso BE, para luego continuar aumentando hasta alcanzar el máximo a los aproximadamente 4 segundos de producida la rotura. A los 10 segundos de producido el LOCA, la temperatura aumenta por un intervalo de alrededor de 7 segundos, pudiendo darse esta situación por la despresurización que se ha producido en el canal para esos tiempos.

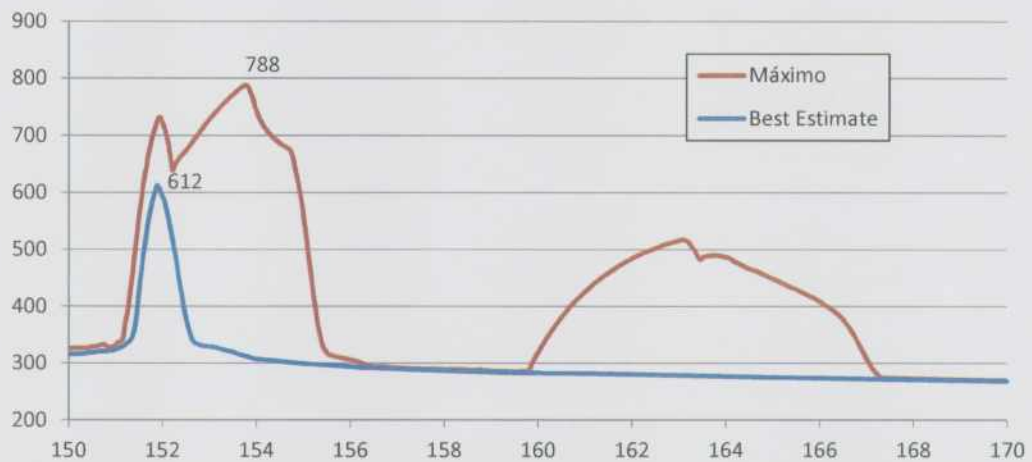


Figura 24. Temperatura de vaina para el máximo valor con incertezas y el caso BE para un LOCA.

Haciendo uso del reporte elaborado por el DAKOTA, se concluye que los factores que más impactan en la temperatura de vaina, según los coeficientes de Spearman, son:

- En mayor medida, la presión en el colector de salida y la potencia.
- En menor medida, la rugosidad.

El coeficiente calculado para la presión en el colector de salida es de 0.90 mientras que para la potencia de 0.31. El correspondiente a la rugosidad un valor de 0.21. En la Figura 25, Figura 26 y Figura 27 se representa la temperatura de vaina en función del factor de la presión del colector de salida, del factor de potencia y del factor de rugosidad respectivamente.

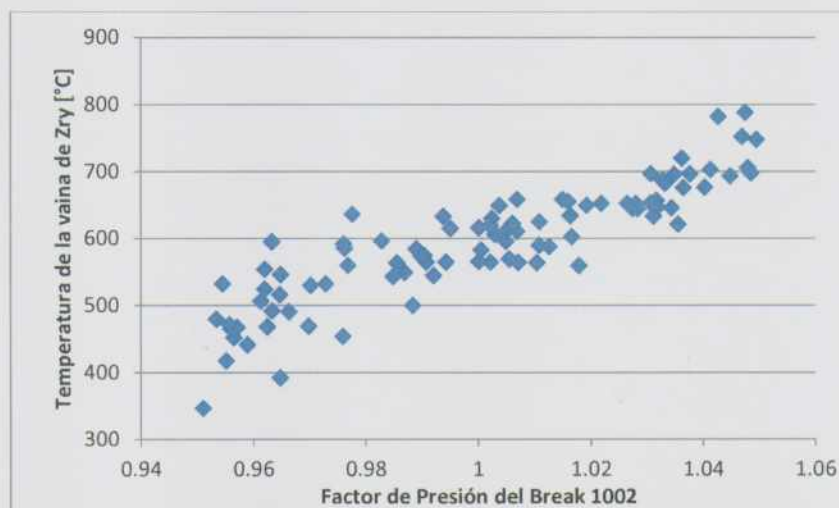


Figura 25. Variabilidad de la temperatura de vaina en función del factor de presión del colector de salida.

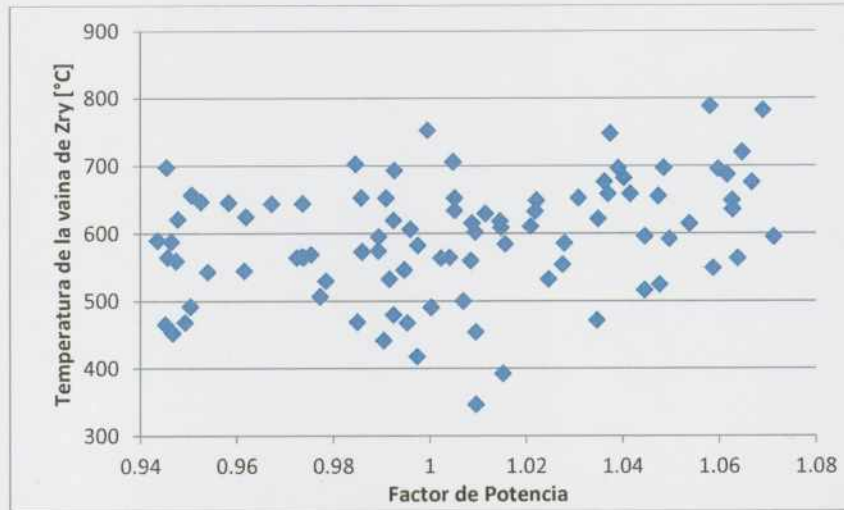


Figura 26. Variabilidad de la temperatura de vaina en función del factor de potencia.

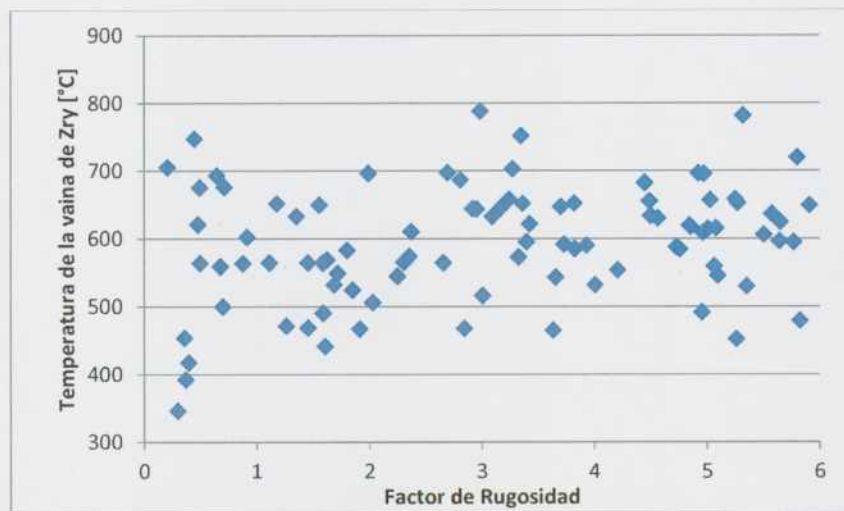


Figura 27. Variabilidad de la temperatura de vaina en función del factor de rugosidad.

En la Figura 28 y Figura 29 se observa el peso de los distintos parámetros con incertezas, que se ha hecho variar en los cálculos para la temperatura del combustible y para la temperatura de la vaina, respectivamente.

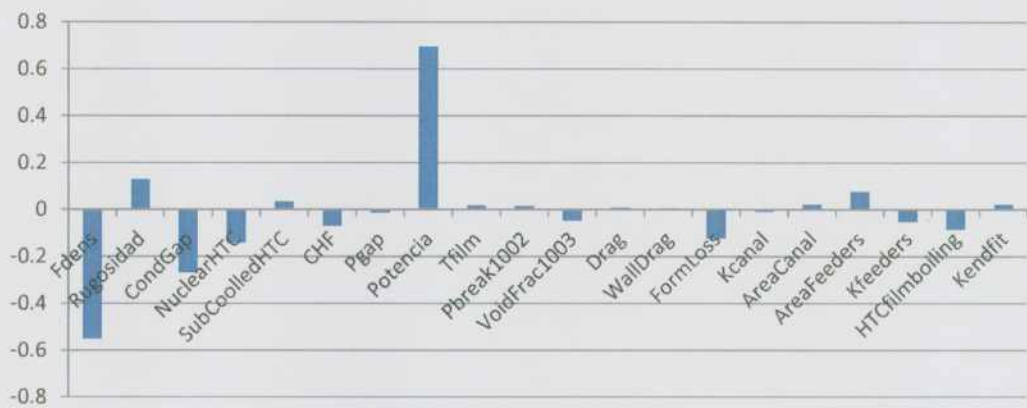


Figura 28. Correlación de los distintos parámetros a la variación de la temperatura de combustible.

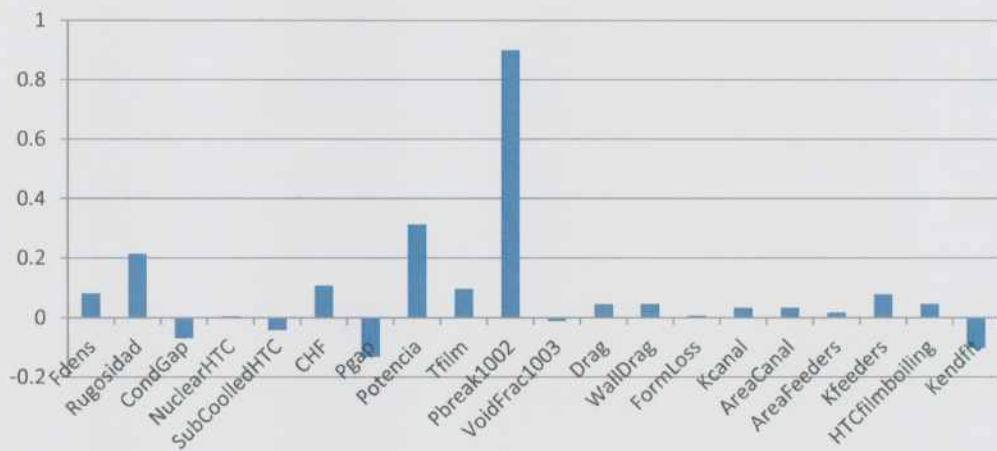


Figura 29. Aporte a la variación de la temperatura de vaina de los distintos parámetros con incertezas.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado el cálculo de las incertezas presentes en un modelo "Best Estimate" de un accidente con pérdida de refrigerante del 40% en un colector de entrada de la CNE. El modelo consistió en los colectores de entrada y salida, los alimentadores, los end fittings y el canal combustible (específicamente el O6).

Se ha utilizado el código termohidráulico TRACE5 en conjunto con el entorno grafico SNAP para llevar a cabo el modelo del canal y el plug-in DAKOTA UNCERTAINTIES para el cálculo de las incertezas.

Se han seleccionado como figuras de mérito la temperatura del centro de la pastilla combustible y la temperatura de la vaina. Estos dos criterios de aceptación seleccionados, variarán según se modifiquen los parámetros que se consideran con incertezas, como se indica en la Tabla 7.

Los parámetros con incertezas que se harán variar son de diversas fuentes: geométricos (diámetros), hidráulicos (pérdidas de cargas), térmicos (excursión de potencia), etc. Estos parámetros varían cada con una determinada distribución probabilística. Estas son casi en su totalidad distribuciones uniformes.

Se han realizado 93 corridas del código para cada uno de los criterios de aceptación seleccionados. Este número de cálculos surge de la fórmula de Wilks al fijar la probabilidad y confianza del 95%.

El valor máximo obtenido para la temperatura de combustible es de 1882 °C, mientras que el de mejor estimación es de 1613 °C. Se ha concluido que la temperatura del centro de la pastilla combustible se ve afectada en mayor medida por la incertidumbre en el valor de la excursión de potencia y en la densidad del combustible.

El valor máximo obtenido para la temperatura de la vaina es de 788 °C, mientras que el de mejor estimación es de 612 °C. Esta es afectada mayormente por la incertidumbre presente en la presión en el colector de descarga del canal combustible y en menor medida en por la potencia y la rugosidad. En menor medida, la temperatura de vaina depende de la potencia y la rugosidad.

5.1. FUTUROS TRABAJOS

Como ya se ha mencionado, el método planteado por el GRS [25] incluye un análisis de sensibilidad. Este es de gran utilidad cuando el modelo presenta mucha cantidad de parámetros con incertezas a los cuales se los puede hacer variar.

Los parámetros a modificar son de diversas fuentes (termohidráulicos, geométricos, etc.) y aportan a la variabilidad de los resultados con distinto peso. El análisis de sensibilidad permite

reducir el número de parámetros a modificar, descartando aquellos que su aporte sea nulo o mínimo, acortando de esta forma el tiempo de cálculo y la complejidad del modelo.

Otro beneficio del análisis de sensibilidad es poder evidenciar el peso que tiene cada uno de los parámetros modificados de forma individual sobre los criterios de aceptación seleccionados.

Se propone para un futuro trabajo realizar un análisis de sensibilidad del evento LOCA del 40% del canal O6 de la CNE.

REFERENCIAS

- [1]. C-6: Requirements for the safety analysis of CANDU nuclear power plants. AECB. 1980
- [2]. Probabilistic Risk Assessment. Pra-tutorial.pdf. <https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/risk-informed/rpp/pra-tutorial.pdf>
- [3]. Guía de seguridad: "N° SSG-2. Análisis determinista de seguridad para centrales nucleares". OIEA. VIENA, 2012.
- [4]. Subcapítulo 15.0. Informe Final de Seguridad. CNA-II Rev. 0. AÑO 2012. NA-SA
- [5]. Safety Reports Series No. 52: Best Estimate Safety Analysis for Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation. OIEA. 2008.
- [6]. Research Article: GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications. Autor: Horst Glaeser. Febrero 2008.
- [7]. OECD/CSNI Workshop on Best Estimate Methods and Uncertainty Evaluations Workshop Proceedings. Barcelona, Spain. 16-18 November 2011. Part 2
- [8]. The Application of Best Estimate and Uncertainty Analysis Methodology to Large LOCA Power Pulse in a CANDU 6 Reactor. Autores: A. Abdul-Razzak, J. Zhang, H. E. Sills, L. Flatt, D. Jenkins, D. J. Wallace, N. Popov. Enero 2002
- [9]. Manual de capacitación para central nuclear embalse. NA-SA. Nivel 2. TM 33100 - Sistema de Transporte de Calor. Rev. N° 1
- [10]. Design manual. Central Nuclear en Embalse - Córdoba. DM-18-37000. Fuel Design Manual. Autor: AECL. 18-3-1982.
- [11]. Capítulo 11. Análisis de accidente. NA-SA. Informe de seguridad - CNE. 1993
- [12]. CANDU Safety #12: Large Loss of Coolant Accident. Autor: Doria, F. J. . Atomic Energy of Canada Limited (AECL).
- [13]. Large-Break LOCA - System thermalhydraulics. Embalse Life Extension Project. 18RF-03500-AR-027. Revision 1. CANDU. 2014
- [14]. Estudio del mapa de circulación natural de un CANDU6 durante una pérdida de refrigerante con RELAP5. Autores: Guala, M.V., Lazarte A.I., Ugarte R.
- [15]. Modelo de la central nuclear embalse con RELAP5: aplicación para un disparo de turbina. Autores: Lazarte A.I., Schiliuk N., Guala M.V. .
- [16]. Tesina: "Análisis y modelado mediante RELAP5 del sistema de Refrigeración de emergencia del núcleo de la CNE". Carrera: Especialización en reactores nucleares y su ciclo de combustible. Autor: Ing. Ricardo Ugarte. 2017
- [17]. Uncertainty evaluation of LOCA 0.1A in CNA-2 2./2.4. Universidad de Pisa, NA-SA. 15/07/2013
- [18]. TRACE Plug-in User's Manual. Symbolic Nuclear Analysis Package (SNAP). Version 3.2.5 - Octubre 25/10/2012. Applied Programming Technology, Inc.
- [19]. TRACE V5.0. THEORY MANUAL. Field Equations, Solution Methods, and Physical Models. NRC. 2008
- [20]. TRACE V5.0. USER'S MANUAL. Volume 1: Input Specification. NRC. 2008.
- [21]. TRACE V5.0. USER'S MANUAL. Volume 2: Modeling Guidelines. NRC. 2008.

- [22]. Dakota. A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.6 Reference Manual. 2007.
- [23]. Dakota. A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.6 Theory Manual. 2007.
- [24]. Dakota, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.6 User's Manual. 2007.
- [25]. GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results. Lecture 22A. Autor: Siegfried Langenbuch. Seminar and Training on Scaling, Uncertainty and 3D Coupled Calculations in Nuclear Technology (3D S. UN. COP 2006), Buenos Aires, Argentina. 2006.
- [26]. Informe: "ES/ 20-2013". Título: Reservado. ARN. 2013.
- [27]. Informe: "ES/ 16-2013". Título: Reservado. ARN. 2013.
- [28]. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Best-Estimate Calculations of Emergency Core Cooling System Performance," U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.157, May 1989.
- [29]. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Acceptance criteria for emergency core cooling systems for light-water nuclear power reactors," Code of Federal Regulations.2007
- [30]. Quantifying reactor safety margins part 3: Assessment and ranging of parameters. Autor: Wulff, W.. Department of nuclear energy, Brookhaven National Laboratory. 1990
- [31]. Uncertainty evaluation of LOCA 0.1A in CNA-2, 2/2.4. Università di Pisa y NA-SA. Autores: A. Petruzzi, M. Lanfredini. 07/2013

APÉNDICE

Tabla Anexo 1. Condiciones de contorno del colector de entrada (Componente Break 1003)

Tiempo [s]	Presión [Pa]	Temp Líquido [k]	Temp Vapor [k]	Fracción de vacío
0	11300000	539.2	589.8	0
0.01	11274600	537.01	592.05	0
0.0201	11264900	536.96	591.98	0
0.04	11267300	536.97	592	0
0.06	11270000	536.97	592.02	0
0.08	11268700	536.97	592.01	0
0.1	11265500	536.97	591.99	0
0.12	11259400	536.96	591.95	0
0.14	11248000	536.96	591.87	0
0.1601	11239300	536.96	591.81	0
0.1801	11232600	536.96	591.77	0
0.2001	11235400	536.96	591.79	0
0.2201	11230200	536.96	591.75	0
0.2401	11212600	536.95	591.63	0
0.2601	11191400	536.94	591.49	0
0.2801	11169400	536.94	591.35	0
0.3001	11151600	536.93	591.23	0
0.3201	11133200	536.93	591.11	0
0.3401	11109400	536.92	590.95	0
0.3601	11081200	536.91	590.76	0
0.3801	11062500	536.91	590.63	0
0.4001	11053800	536.91	590.57	0
0.4201	11041600	536.9	590.49	0
0.4401	11024400	536.9	590.37	0
0.4601	11006300	536.89	590.25	0
0.4801	10991400	536.89	590.15	0
0.5001	10980800	536.89	590.08	0
0.5201	10971300	536.89	590.02	0
0.5401	10957800	536.88	589.93	0
0.5601	10941400	536.88	589.81	0
0.5801	10927000	536.88	589.72	0
0.6001	10915100	536.87	589.64	0
0.6201	10906300	536.87	589.58	0
0.6401	10900200	536.87	589.53	0

0.6601	10891800	536.87	589.48	0
0.6801	10882000	536.87	589.41	0
0.7001	10875200	536.87	589.36	0
0.7201	10871700	536.87	589.34	0
0.7401	10868900	536.87	589.32	0
0.7601	10881000	536.87	589.4	0
0.7801	10893900	536.87	589.49	0
0.8001	10885800	536.87	589.44	0
0.8201	10901700	536.88	589.54	0
0.8401	10915100	536.88	589.64	0
0.8601	10930000	536.88	589.74	0
0.8801	10932100	536.88	589.75	0
0.9001	10939000	536.89	589.8	0
0.9201	10943400	536.89	589.83	0
0.9401	10953000	536.89	589.89	0
0.9601	10963800	536.89	589.97	0
0.9801	10973000	536.89	590.03	0
1.0001	10979700	536.89	590.07	0
1.0201	10991300	536.89	590.15	0
1.0401	10989700	536.89	590.14	0
1.0601	10997600	536.88	590.19	0
1.0801	10983000	536.88	590.1	0
1.1001	10995500	536.88	590.18	0
1.1201	11018900	536.88	590.34	0
1.1401	11041800	536.88	590.49	0
1.1601	11051100	536.88	590.55	0
1.1801	11062400	536.87	590.63	0
1.2001	11079300	536.87	590.74	0
1.2201	11053700	536.86	590.57	0
1.2401	11050100	536.85	590.55	0
1.2601	11078000	536.85	590.74	0
1.2801	11078100	536.85	590.74	0
1.3001	11075200	536.84	590.72	0
1.3201	11050000	536.82	590.55	0
1.3401	11079400	536.82	590.74	0
1.3601	11022000	536.8	590.36	0
1.3801	11050200	536.8	590.55	0
1.4001	11045100	536.79	590.51	0

1.4201	11065100	536.79	590.65	0
1.4401	11003100	536.76	590.23	0
1.4601	11033800	536.76	590.44	0
1.4801	11061300	536.76	590.62	0
1.5001	11078300	536.75	590.74	0
1.5201	11082800	536.75	590.77	0
1.5401	11010100	536.72	590.28	0
1.5601	11028200	536.71	590.4	0
1.5801	11055400	536.71	590.58	0
1.6001	11053000	536.7	590.57	0
1.6201	11048400	536.69	590.54	0
1.6401	11054100	536.68	590.58	0
1.6601	11047200	536.67	590.53	0
1.6801	11055100	536.66	590.58	0
1.7001	11066900	536.65	590.66	0
1.7201	11069500	536.64	590.68	0
1.7401	11031000	536.62	590.42	0
1.7601	11036900	536.61	590.46	0
1.7801	11047000	536.61	590.53	0
1.8001	11041900	536.59	590.49	0
1.8201	11033900	536.58	590.44	0
1.8401	11034000	536.57	590.44	0
1.8601	11025600	536.56	590.38	0
1.8801	11022300	536.55	590.36	0
1.9001	11020200	536.54	590.35	0
1.9201	11015000	536.53	590.31	0
1.9401	11006400	536.51	590.25	0
1.9601	11000600	536.5	590.21	0
1.9801	10992600	536.49	590.16	0
2	10982700	536.48	590.09	0
2.0001	10982700	536.48	590.09	0
2.5021	10690400	536.11	588.1	0
3.0043	10387100	535.59	585.98	0
3.5038	9882020	534.7	582.35	0
4.0045	9387800	533.46	578.65	0
4.5034	8923040	532.21	575.03	0
5.0032	8505090	531.12	571.65	0.0000054
6.0125	7855060	529.65	566.12	0.0003901
7.0125	7421620	529.29	562.24	0.0013659
8.0125	7076370	529.52	559.03	0.0040741

9.0125	6608640	530.02	554.42	0.0111301
10.006	6428140	531.07	552.75	0.0167943
11.0071	6326200	532.47	551.6	0.0132148
12.0066	6221150	533.72	550.5	0.011226
13.0066	6093280	534.22	549.15	0.0101739
14.0073	5943040	534.01	547.54	0.0092099
15.0064	5797650	533.54	545.95	0.008501
16.0059	5670790	533.04	544.54	0.0082591
17.0064	5553730	532.54	543.22	0.0084249
18.0052	5454970	532.06	542.08	0.0086893
19.0047	5356060	531.57	540.93	0.0088532
20.0044	5239300	530.94	539.56	0.0084781

Tabla Anexo 2. Condiciones de contorno del Colector de Salida (Componente Break 1002)

Tiempo [s]	Presión [Pa]	Temp Líquido [k]	Temp Vapor [k]	Fracción de vacío
0	9980000	583.062	583.062	0
0.01	10023400	583.45	583.37	0.0998266
0.02	10028000	583.44	583.44	0.101364
0.04	10024200	583.44	583.37	0.102107
0.06	10016300	583.44	583.29	0.102661
0.08	9981730	583.42	583.05	0.103315
0.1	9954610	583.4	582.85	0.102345
0.12	9921100	583.37	582.6	0.10216
0.14	9916490	583.35	582.61	0.103126
0.16	9938580	583.32	582.77	0.104898
0.18	9910320	583.27	582.53	0.108986
0.2	9894470	583.21	582.42	0.113191
0.22	9879370	583.16	582.31	0.114677
0.24	9871780	583.1	582.27	0.117584
0.26	9864180	583.03	582.21	0.120852
0.28	9857730	582.97	582.16	0.123643
0.3	9849840	582.9	582.1	0.126348
0.32	9846430	582.84	582.08	0.128654
0.34	9842890	582.77	582.06	0.131086
0.36	9838860	582.71	582.03	0.133547
0.38	9834060	582.66	581.99	0.135943
0.4	9829470	582.61	581.96	0.138223
0.42	9824850	582.56	581.92	0.140354
0.44	9819790	582.51	581.89	0.142335
0.46	9814320	582.47	581.84	0.144178
0.48	9808510	582.43	581.8	0.145908
0.5	9802650	582.39	581.76	0.147541
0.52	9796860	582.35	581.72	0.149075
0.54	9791000	582.31	581.67	0.150523
0.56	9785110	582.26	581.63	0.151911
0.58	9779450	582.22	581.59	0.153266
0.6	9773920	582.18	581.55	0.154609
0.62	9768790	582.14	581.51	0.155936
0.64	9764190	582.1	581.47	0.157228

0.66	9759890	582.06	581.44	0.158465
0.68	9756430	582.03	581.42	0.159623
0.7	9833510	582.03	582.18	0.159803
0.72	9882100	582.04	582.28	0.160362
0.74	9783110	581.98	581.59	0.162515
0.76	9774120	581.97	581.55	0.162822
0.78	9771350	581.96	581.53	0.162748
0.8	9772850	581.96	581.54	0.162434
0.82	9769560	581.95	581.51	0.162213
0.84	9770160	581.94	581.52	0.162093
0.86	9776950	581.94	581.58	0.161876
0.88	9781240	581.94	581.6	0.161707
0.9	9783170	581.94	581.62	0.161606
0.92	9791370	581.95	581.69	0.161431
0.94	9789800	581.95	581.65	0.161348
0.96	9827920	581.97	582.06	0.16083
0.98	9832220	581.98	581.95	0.160148
1	9837690	581.99	582.05	0.159769
1.02	9835080	581.99	581.99	0.159586
1.04	9844300	582.01	582.05	0.159294
1.06	9871410	582.04	582.3	0.158697
1.08	9887540	582.06	582.4	0.158411
1.1	9893850	582.08	582.44	0.158261
1.12	9905980	582.1	582.54	0.157713
1.14	9911940	582.12	582.58	0.15691
1.16	9927690	582.15	582.71	0.155821
1.18	9946660	582.18	582.85	0.154502
1.2	9964930	582.21	582.97	0.153019
1.22	9978590	582.24	583.06	0.151432
1.24	9981650	582.26	583.08	0.149738
1.26	9965440	582.28	582.95	0.147858
1.28	9974740	582.31	583.03	0.145975
1.3	10005700	582.35	583.27	0.144226
1.32	10026200	582.38	583.41	0.142584
1.34	10031700	582.41	583.44	0.140963
1.36	10033500	582.44	583.45	0.139527
1.38	10034300	582.46	583.46	0.138667
1.4	1004370	582.49	583.53	0.138123

	0			
1.42	1006130 0	582.52	583.66	0.13791
1.44	1008140 0	582.56	583.8	0.137968
1.46	1009780 0	582.59	583.92	0.138325
1.48	1009410 0	582.61	583.88	0.139128
1.5	1009040 0	582.64	583.87	0.139901
1.52	1011210 0	582.68	584.03	0.140832
1.54	1013550 0	582.71	584.19	0.142117
1.56	1015080 0	582.75	584.29	0.14365
1.58	1015200 0	582.78	584.31	0.145843
1.6	1016370 0	582.82	584.41	0.148173
1.62	1016510 0	582.85	584.41	0.15038
1.64	1018790 0	582.89	584.58	0.152628
1.66	1020690 0	582.94	584.71	0.155198
1.68	1022130 0	582.98	584.81	0.158039
1.7	1023640 0	583.02	584.91	0.161056
1.72	1024410 0	583.07	584.96	0.164335
1.74	1025810 0	583.11	585.07	0.167966
1.76	1027680 0	583.16	585.21	0.171871
1.78	1028040 0	583.21	585.22	0.176143
1.8	1027600 0	583.26	585.2	0.180182
1.82	1029680 0	583.31	585.35	0.18428
1.84	1030680 0	583.36	585.41	0.18913
1.86	1030790 0	583.41	585.42	0.194497

1.88	1031730 0	583.47	585.49	0.200105
1.9	1032480 0	583.52	585.54	0.2059
1.92	1032750 0	583.58	585.56	0.211913
1.94	1032540 0	583.63	585.55	0.218063
1.96	1033040 0	583.69	585.58	0.224327
1.98	1033410 0	583.75	585.61	0.230935
2	1033420 0	583.8	585.6	0.237625
2.502	1017860 0	584.76	584.49	0.477908
3.004	9862780	582.8	582.17	0.742567
3.504	9253010	578.46	577.24	0.833821
4.005	8635410	573.39	572.34	0.842597
4.503	8056940	568.51	567.57	0.820844
5.003	7568850	564.33	563.36	0.782
6.012	6881270	557.8	557.06	0.626145
7.012	6557100	554.61	553.87	0.551501
8.012	6352450	552.42	551.88	0.516308
9.012	6232770	551.06	550.61	0.474851
10.006	6213050	550.64	550.45	0.457703
11.007	6223730	550.85	550.55	0.542
12.007	6140470	549.95	549.6	0.792791
13.007	6019530	548.62	548.25	0.878674
14.007	5876390	547.06	546.69	0.902725
15.006	5736740	545.51	545.16	0.927586
16.006	5612470	544.11	543.74	0.953569
17.006	5500540	542.83	542.49	0.941542
18.005	5402440	541.72	541.35	0.942399
19.005	5306080	540.57	540.23	0.940702
20.004	5220640	539.56	539.23	0.92565

Tabla Anexo 3. Datos Geométricos de los equipos modelados en TRACE5.

Break 1003 (HDR6B) - Condición de Contorno de entrada		
Característica	Valor	Unidad
Longitud	2	m
Volumen	0.12973	m ³

Componente	Equipo	
Pipe 1010	Colector de entrada HDR6B	
Característica	Valor	Unidad
Longitud	1.64302 24	m
Volumen	0.10655	m ³
N° de celdas	2	
Coeficiente K perdida de carga		
Borde 2	0.35	

Componente	Equipo		
Pipe 1011	Alimentador de entrada O6		
N° de celdas	15		
Celda	Volumen (m ³)	Longitud (m)	Orientación (Eje Z)
1	0.00216	0.7916	-0.6
2	0.00260	0.94992	0
3	0.00260	0.94992	0
4	0.00260	0.94992	0
5	0.00260	0.94992	0
6	0.00260	0.94992	0
7	0.00325	1.1874	-1.1574
8	0.00325	1.1874	-1.1574
9	0.00325	1.1874	-1.1574
10	0.00325	1.1874	-1.1574
11	0.00325	1.1874	-1.1574
12	0.00216	0.7916	-0.6
13	0.00271	0.9895	0
14	0.00271	0.9895	0
15	0.00216	0.7916	-0.08908
Coeficiente K perdida de carga			
Borde	Factor K flujo directo	Factor K flujo inverso	
1	0.35	0	
2	0	0.35	
6	0.33	0	

7	0	0.33
11	0.36	0
12	0.36	0.36
13	0	0.36
14	0.69	0
15	0	0.69
16	0	1.31

Componente	Equipo	
Pipe 1012	End Fitting de entrada	
Característica	Valor	Unidad
Longitud	1.584	m
Volumen	0.00923	m ³
N° de celdas	2	
Coefficiente K perdida de carga		
Borde	Factor K flujo directo	Factor K flujo inverso
1	0	1.31
2	0.5	0.5
3	0	0

Componente	Equipo	
Pipe 1013	Acople	
Característica	Valor	Unidad
Longitud	0.396	m
Volumen	0.00231	m ³
N° de celdas	1	
Coefficiente K perdida de carga		
Borde 2	0.98	

Componente	Equipo	
Pipe 1100	Canal Combustible O6	
N° de celdas	24	
Celda	Volumen (m3)	Longitud (m)
1-24	0.000848	0.24766667
Coefficiente K perdida de carga		
Borde	Factor K flujo directo	Factor K flujo inverso
1	0.98	0.98
2-24	0.415	0.415
25	0.98	0.98

Componente	Equipo	
Pipe 1016	Acople	
Característica	Valor	Unidad
Longitud	0.792	m
Volumen	0.00461	m ³
N° de celdas	1	
Coeficiente K perdida de carga		
Borde 1	0.98	

Componente	Equipo	
Pipe 1017	End Fitting de salida	
Característica	Valor	Unidad
Longitud	1.584	m
Volumen	0.00923	m ³
N° de celdas	2	
Coeficiente K perdida de carga		
Borde	Factor K flujo directo	Factor K flujo inverso
1	0	0
2	0.5	0.5
3	0	1.31

Componente	Equipo		
Pipe 1018	Alimentador de salida O6		
N° de celdas	15		
Celda	Volumen (m3)	Longitud (m)	Orientación (Eje Z)
1	0.004539	0.7916	0.6
2-6	0.005447	0.94992	0
7-11	0.006809	1.1874	1.1574
12	0.004539	0.7916	0.6
13	0.005674	0.9895	0
14	0.005674	0.9895	0
15	0.004539	0.7916	0.08908
Coeficiente K perdida de carga			
Borde	Factor K flujo directo	Factor K flujo inverso	
15	0.32	0.32	
10	0.31	0.31	
5	0.33	0.33	
4	0.33	0.33	
2	0.64	0.64	
1	0	1.31	

Componente	Equipo	
Pipe 1019	Colector de salida hdr6b	
Característica	Valor	Unidad
Longitud	2.0004626	m
Volumen	0.12973	m ³
N° de celdas	2	
Coeficiente K perdida de carga		
Borde 1	0.35	

Break 1002 (HDR7B) - Condición de Contorno Salida		
Característica	Valor	Unidad
Longitud	2	m
Volumen	0.12973	m ³

Tabla Anexo 4. Características de la estructura de calor modelada en TRACE5.

Componente	Equipo	
Heat Structure 5551	Estructura de Calor del Canal Combustible O6	
N° de celdas	24	
Multiplicador de área	37	
Nodos radiales	Radio Interno [m]	Radio Externo [m]
UO2	0.00000	0.00101
UO2	0.00101	0.00203
UO2	0.00203	0.00304
UO2	0.00304	0.00405
UO2	0.00405	0.00506
UO2	0.00506	0.00608
Gas	0.00608	0.00612
Zircaloy	0.00612	0.00633
Zircaloy	0.00633	0.00654

Tabla Anexo 5. Características del componente de potencia del canal modelado en TRACE5.

Tiempo [s]	Potencia [W]	Tiempo [s]	Potencia [W]	Tiempo [s]	Potencia [W]	Tiempo [s]	Potencia [W]
0	7.30E+06	0.6	1.43E+07	1.22	3.10E+07	1.84	7.30E+06
0.01	7.52E+06	0.62	1.47E+07	1.24	3.12E+07	1.86	6.42E+06
0.02	7.52E+06	0.64	1.51E+07	1.26	3.12E+07	1.88	5.62E+06
0.04	7.52E+06	0.66	1.55E+07	1.28	3.12E+07	1.9	4.82E+06
0.06	7.52E+06	0.68	1.59E+07	1.3	3.12E+07	1.92	4.16E+06

0.08	7.59E+06	0.7	1.64E+07	1.32	3.11E+07	1.94	3.58E+06
0.1	7.59E+06	0.72	1.68E+07	1.34	3.10E+07	1.96	3.14E+06
0.12	7.66E+06	0.74	1.72E+07	1.36	3.07E+07	1.98	2.85E+06
0.14	7.74E+06	0.76	1.77E+07	1.38	3.04E+07	2	2.55E+06
0.16	7.81E+06	0.78	1.82E+07	1.4	3.01E+07	2.5	1.46E+06
0.18	7.88E+06	0.8	1.87E+07	1.42	2.96E+07	3	1.17E+06
0.2	8.03E+06	0.82	1.92E+07	1.44	2.91E+07	3.5	1.02E+06
0.22	8.25E+06	0.84	1.98E+07	1.46	2.85E+07	4	9.49E+05
0.24	8.39E+06	0.86	2.04E+07	1.48	2.80E+07	4.5	8.76E+05
0.26	8.61E+06	0.88	2.10E+07	1.5	2.72E+07	5	8.76E+05
0.28	8.91E+06	0.9	2.15E+07	1.52	2.64E+07	6.01	8.03E+05
0.3	9.12E+06	0.92	2.22E+07	1.54	2.55E+07	7.01	7.30E+05
0.32	9.42E+06	0.94	2.29E+07	1.56	2.46E+07	8.01	6.57E+05
0.34	9.78E+06	0.96	2.36E+07	1.58	2.36E+07	9.01	6.57E+05
0.36	1.01E+07	0.98	2.43E+07	1.6	2.25E+07	10.01	5.84E+05
0.38	1.04E+07	1	2.50E+07	1.62	2.13E+07	11.01	5.84E+05
0.4	1.07E+07	1.02	2.57E+07	1.64	2.01E+07	12.01	5.84E+05
0.42	1.11E+07	1.04	2.64E+07	1.66	1.88E+07	13.01	5.84E+05
0.44	1.14E+07	1.06	2.71E+07	1.68	1.74E+07	14.01	5.11E+05
0.46	1.18E+07	1.08	2.77E+07	1.7	1.61E+07	15.01	5.11E+05
0.48	1.21E+07	1.1	2.83E+07	1.72	1.47E+07	16.01	5.11E+05
0.5	1.25E+07	1.12	2.89E+07	1.74	1.34E+07	17.01	5.11E+05
0.52	1.28E+07	1.14	2.94E+07	1.76	1.20E+07	18.01	5.11E+05
0.54	1.32E+07	1.16	2.99E+07	1.78	1.08E+07	19	5.11E+05
0.56	1.36E+07	1.18	3.03E+07	1.8	9.56E+06	20	4.38E+05
0.58	1.39E+07	1.2	3.07E+07	1.82	8.39E+06		

Longitud [m]	Perfil de Potencia normalizado	Longitud [m]	Perfil de Potencia normalizado
0.12383333	0.01115	3.09583337	0.05896
0.3715	0.01959	3.34350004	0.05826
0.61916667	0.02802	3.59116671	0.05672
0.86683334	0.03438	3.83883338	0.05449
1.11450001	0.04054	4.08650005	0.05105
1.36216668	0.04471	4.33416672	0.04733
1.60983335	0.04845	4.58183339	0.04286
1.85750002	0.05159	4.82950006	0.0381
2.10516669	0.05452	5.07716673	0.03202
2.35283336	0.05661	5.32483334	0.02579
2.60050003	0.05823	5.57250007	0.01806

2.8481667	0.05823	5.82016674	0.01034
-----------	---------	------------	---------

Tabla Anexo 6. Condición inicial de los componentes del modelo.

Break 1003 - Entrada			Break 1002 - Salida		
Presión	1.13E+07	Pa	Presión	9.98E+06	Pa
Temperatura	574.8	K	Temperatura	574.801	K

Pipe 1010 - hdr6b Colector de entrada					
Celda	Presión	Temperatura Liquido [K]	Temperatura Vapor [K]	Fracción de Vacío	Presión Parcial de no condensables
1	1.13E+07	539.202	592.259	0	0

Pipe 1011 - Alimentador de entrada O6					
Celda	Presión [Pa]	Temperatura Liquido [K]	Temperatura Vapor [K]	Fracción de Vacío	Presión Parcial de no condensables [Pa]
1	1.13E+07	539.19	592.004	0	0
2	1.13E+07	539.188	591.964	0	0
3	1.13E+07	539.185	591.901	0	0
4	1.12E+07	539.182	591.839	0	0
5	1.12E+07	539.179	591.777	0	0
6	1.12E+07	539.171	591.609	0	0
7	1.12E+07	539.17	591.571	0	0
8	1.12E+07	539.169	591.558	0	0
9	1.12E+07	539.168	591.545	0	0
10	1.12E+07	539.168	591.532	0	0
11	1.12E+07	539.162	591.404	0	0
12	1.12E+07	539.156	591.272	0	0
13	1.12E+07	539.154	591.231	0	0
14	1.11E+07	539.14	590.943	0	0
15	1.11E+07	539.138	590.886	0	0

Pipe 1012 - End Fitting de entrada					
Celda	Presión [Pa]	Temperatura Liquido [K]	Temperatura Vapor [K]	Fracción de Vacío	Presión Parcial de no condensables [Pa]
1	1.11E+07	539.148	591.113	0	0
2	1.11E+07	539.145	591.048	0	0

Pipe 1013 - Acople de entrada					
Celda	Presión [Pa]	Temperatura Liquido [K]	Temperatura Vapor [K]	Fracción de Vacío	Presión Parcial de no condensables [Pa]
1	1.11E+07	539.145	591.048	0	0

Pipe 1100 - Canal Combustible					
Celda	Presión [Pa]	Temperatura Liquido [K]	Temperatura Vapor [K]	Fracción de Vacío	Presión Parcial de no condensables [Pa]
1	1.11E+07	539.836	590.706	0	0
2	1.10E+07	541.013	590.489	0	0
3	1.10E+07	542.686	590.271	0	0
4	1.10E+07	544.74	590.053	0	0
5	1.09E+07	547.162	589.832	0	0
6	1.09E+07	549.815	589.607	0	0
7	1.09E+07	552.727	589.381	0	0
8	1.08E+07	555.807	589.155	0	0
9	1.08E+07	559.061	588.925	0	0
10	1.08E+07	562.249	588.69	0	0
11	1.07E+07	565.454	588.454	0	0
12	1.07E+07	568.653	588.215	0	0
13	1.07E+07	571.888	587.975	0	0
14	1.06E+07	575.084	587.73	0	0
15	1.06E+07	578.171	587.484	0	0
16	1.06E+07	581.066	587.23	0	0
17	1.05E+07	583.625	586.975	0	0
18	1.05E+07	585.853	586.718	0	0
19	1.05E+07	587.486	587.054	0.06823059	0
20	1.04E+07	587.594	586.162	0.15406848	0
21	1.04E+07	587.059	585.057	0.21906772	0
22	1.03E+07	586.482	584.378	0.26767474	0
23	1.02E+07	585.859	584.635	0.30247632	0
24	1.02E+07	585.212	584.479	0.31963721	0

Pipe 1016 - Acople de salida					
Celda	Presión [Pa]	Temperatura Liquido [K]	Temperatura Vapor [K]	Fracción de Vacío	Presión Parcial de no condensables [Pa]
1	1.02E+07	584.346	584.349	0.32670093	0

Pipe 1017 - End Fitting de salida					
Celda	Presión [Pa]	Temperatura Liquido [K]	Temperatura Vapor [K]	Fracción de Vacío	Presión Parcial de no condensables [Pa]
1	1.01E+07	584.269	584.747	0.32609358	0
2	1.01E+07	584.152	584.237	0.33182058	0

Pipe 1018 - Alimentador de salida O6					
Celda	Presión [Pa]	Temperatura Liquido [K]	Temperatura Vapor [K]	Fracción de Vacío	Presión Parcial de no condensables [Pa]
1	1.01E+07	584.073	584.681	0.32784373	0
2	1.01E+07	583.971	584.133	0.34876931	0
3	1.01E+07	583.933	584.101	0.32826373	0
4	1.01E+07	583.869	584.364	0.33408996	0
5	1.01E+07	583.769	583.934	0.34051791	0
6	1.01E+07	583.693	583.798	0.34222585	0
7	1.01E+07	583.62	583.641	0.34341142	0
8	1.00E+07	583.547	583.504	0.34469143	0
9	1.00E+07	583.473	583.4	0.34019193	0
10	1.00E+07	583.389	583.294	0.35963404	0
11	1.00E+07	583.351	583.316	0.36503711	0
12	1.00E+07	583.323	583.291	0.36699706	0
13	1.00E+07	583.297	583.264	0.36844119	0
14	1.00E+07	583.27	583.23	0.34704721	0
15	1.00E+07	583.207	583.117	0.35819018	0

Pipe 1019 - hdr6b Colector de salida					
Celda	Presión	Temperatura Liquido [K]	Temperatura Vapor [K]	Fracción de Vacío	Presión Parcial de no condensables
1	9.99E+06	583.133	583.123	0.20842136	0

Tabla Anexo 7. Resultados de los 93 cálculos realizados para la temperatura de combustible.

N° de calculo	Temperatura de combustible [°C]	N° de calculo	Temperatura de combustible [°C]	N° de calculo	Temperatura de combustible [°C]
1	1602.28613	32	1530.5061	63	1705.42542
2	1668.34595	33	1658.4613	64	1702.65833
3	1614.56653	34	1593.20618	65	1501.71643
4	1658.99097	35	1659.8573	66	1756.04858
5	1638.12671	36	1808.95264	67	1610.04785
6	1661.83496	37	1499.0166	68	1657.8219

7	1810.7373	38	1633.38062	69	1662.89587
8	1642.43848	39	1661.2793	70	1670.13879
9	1783.57861	40	1467.70923	71	1666.74011
10	1792.23218	41	1553.04468	72	1633.02478
11	1610.26611	42	1737.32104	73	1545.32446
12	1476.42627	43	1480.13721	74	1682.39929
13	1601.99084	44	1546.25415	75	1657.88855
14	1541.06189	45	1828.57031	76	1592.95691
15	1670.09167	46	1818.87769	77	1623.56079
16	1603.11646	47	1719.84985	78	1534.5498
17	1675.18042	48	1689.24255	79	1665.96057
18	1721.17981	49	1524.70972	80	1694.68787
19	1663.36511	50	1607.31201	81	1523.01538
20	1754.60608	51	1644.28345	82	1555.64404
21	1539.27539	52	1676.61475	83	1620.43933
22	1549.09094	53	1678.32739	84	1684.84314
23	1636.99829	54	1520.63318	85	1775.04053
24	1813.11743	55	1595.67529	86	1608.56042
25	1713.86255	56	1636.70288	87	1655.40918
26	1548.98193	57	1759.62329	88	1479.39087
27	1569.59729	58	1511.32068	89	1645.97302
28	1637.15747	59	1628.86719	90	1484.76855
29	1794.6521	60	1612.94458	91	1869.33594
30	1695.55945	61	1882.20142	92	1696.68018
31	1860.34473	62	1655.82812	93	1624.26196

Tabla Anexo 8. Resultados de los 93 cálculos realizados para la temperatura de vaina.

N° de calculo	Temperatura de vaina [°C]	N° de calculo	Temperatura de vaina [°C]	N° de calculo	Temperatura de vaina [°C]
1	959.75891	32	690.65973	63	858.45258
2	925.34753	33	909.11652	64	764.80054
3	893.85931	34	665.30725	65	968.49579
4	931.25592	35	805.22064	66	740.91302
5	838.41333	36	955.01758	67	878.8031
6	921.82971	37	817.78302	68	726.95288
7	905.4165	38	788.9649	69	826.95306
8	924.97491	39	925.49048	70	918.36841
9	714.43756	40	737.97406	71	741.73749
10	965.98169	41	1054.65137	72	837.52423
11	922.32611	42	805.24652	73	763.5343

12	619.21234	43	752.28345	74	1061.05249
13	887.70465	44	949.23828	75	1020.65002
14	902.85687	45	837.65338	76	929.83557
15	1025.08899	46	857.27747	77	797.33978
16	818.79681	47	969.41193	78	845.97809
17	847.2027	48	948.33051	79	894.73431
18	881.7774	49	970.57306	80	916.62799
19	821.87079	50	992.81348	81	892.30658
20	802.89386	51	832.66876	82	855.62085
21	868.96576	52	925.09418	83	837.34625
22	841.73737	53	740.34467	84	832.07349
23	875.18793	54	890.8938	85	744.42004
24	897.50421	55	906.7002	86	836.30505
25	868.21716	56	836.70892	87	919.88898
26	883.48969	57	888.48218	88	917.14386
27	772.84723	58	975.73712	89	867.60614
28	725.13068	59	837.6496	90	928.08337
29	978.4212	60	862.66345	91	816.16077
30	864.80811	61	779.22156	92	860.67352
31	969.83405	62	931.52393	93	905.99445