

## Resumen

Esta memoria incluye una primera parte descriptiva de los modelos de planta de Ascó y Vandellós II, modelos realizados para el código de cálculo RELAP5, haciendo hincapié en los generadores de vapor, objeto de estudio principal en el presente proyecto.

El siguiente estudio pretende consolidar la idoneidad de varios aspectos del actual modelo de generador de vapor de la central nuclear de Ascó y para ello se manipulan en primer lugar los parámetros ficticios de control que definen la temperatura del agua de alimentación principal con el objetivo de obtener un comportamiento simulado más ajustado a la realidad.

Se analiza el efecto de incorporar estructuras de calor en la camisa y la carcasa de los generadores de vapor con dos transitorios accidentales donde éstas cobran especial importancia tras la entrada del agua de alimentación auxiliar: la pérdida de suministro eléctrico exterior y la pérdida total de agua de alimentación.

Finalmente se modelan los miles de tubos en U de los generadores de vapor con 5 nodos y se compara su comportamiento con el actual modelo desarrollado por el GET (*Grup d'Estudis Termohidràulics*), que consta de un único nodo, con un transitorio de pérdida de refrigerante.

A la vista de todos los resultados obtenidos tras los cambios introducidos, se afirma que el modelo actual de generador de vapor es adecuado por su simplicidad y correcto en los resultados.





## Sumario

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>SUMARIO</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSARIO</b>	<b>7</b>
<b>2. PREFACIO</b>	<b>11</b>
2.1. Origen del proyecto .....	11
2.2. Motivación .....	11
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>
3.1. Objetivos del proyecto .....	13
<b>4. MODELO DE PLANTA</b>	<b>15</b>
4.1. Descripción del código de cálculo RELAP5/MOD3.2.....	15
4.2. Descripción de los modelos de Ascó y Vandellós II.....	17
4.2.1. Introducción .....	17
4.2.2. Reactor nuclear.....	18
4.2.3. Sistemas principales .....	18
4.2.4. Sistemas auxiliares .....	21
4.2.5. Sistemas de seguridad.....	22
<b>5. COMPARACIÓN ENTRE LOS GENERADORES DE VAPOR DE LAS C.N. ASCÓ Y VANDELLÓS II</b>	<b>25</b>
5.1. Introducción .....	25
5.2. Rechazo de carga del 100 al 50% .....	25
5.2.1. Documentación .....	28
5.3. Comparación entre generadores de vapor.....	30
5.4. Influencia de la temperatura del AAP sobre el nivel de rango estrecho.....	32
<b>6. INFLUENCIA DE LAS ESTRUCTURAS DE CALOR EN LA CAMISA Y CARCASA DE LOS GENERADORES DE VAPOR.</b>	<b>35</b>
6.1. Introducción .....	35
6.2. Pérdida de suministro eléctrico exterior .....	36
6.2.1. Descripción del transitorio .....	36
6.2.2. Comparativa de resultados .....	42
6.2.3. Conclusiones de la pérdida de suministro eléctrico exterior.....	48
6.2.4. Documentación .....	48



---

6.3. Pérdida total de agua de alimentación con maniobra de feed&bleed y recuperación del foco frío.....	50
6.3.1. Descripción del transitorio.....	50
6.3.2. Comparativa de resultados .....	59
6.3.3. Conclusiones de la pérdida total de agua de alimentación. ....	64
6.3.4. Documentación.....	64
<b>7. ANÁLISIS DE INCORPORAR 5 TUBOS EN U EN LOS GENERADORES DE VAPOR</b> .....	<b>66</b>
7.1. Introducción .....	66
7.2. LOCA .....	67
7.2.1. Descripción del transitorio.....	67
7.2.2. Comparativa de resultados .....	76
7.2.3. Conclusiones .....	79
7.2.4. Documentación.....	80
<b>8. CONCLUSIONES</b> .....	<b>81</b>
<b>9. AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>83</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>85</b>







## 1. Glosario

<b>AAA:</b>	Agua de alimentación auxiliar
<b>AAP:</b>	Agua de alimentación principal
<b>BOL:</b>	<i>Beginning of life</i> . Principio de vida del combustible nuclear
<b>BRR's:</b>	Bombas del refrigerante del reactor
<b>C.N.:</b>	Central Nuclear
<b>CNA.:</b>	Central Nuclear de Ascó
<b>CSN:</b>	Consejo de Seguridad Nacional
<b>CNV II:</b>	Central Nuclear de Vandellós II
<b>ETSEIB:</b>	<i>Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona</i>
<b>Feed&amp;Bleed:</b>	Maniobra de seguridad durante un transitorio que consiste en alimentar y sangrar
<b>GET:</b>	<i>Grup d'Estudis Termohidràulics</i>
<b>GV:</b>	Generador de vapor
<b>HPI:</b>	Sistema de inyección de seguridad de alta presión
<b>Input:</b>	Fichero de entrada de datos
<b>IOE:</b>	Instrucciones de operación en emergencia
<b>LOCA:</b>	Accidente de pérdida de refrigerante del primario
<b>LPI:</b>	Sistema de inyección de seguridad de baja presión
<b>MSR:</b>	Re-calentador separador de humedad
<b>NRC:</b>	<i>Nuclear Regulatory Commission</i>
<b>Output:</b>	Fichero de salida de datos
<b>PFC:</b>	Proyecto final de carrera
<b>PORV:</b>	Válvula motorizada de alivio del presionador
<b>PWR:</b>	Reactor de agua a presión



---

<b>PZR:</b>	Presionador
<b>R.A.:</b>	Rango ancho
<b>R.E.:</b>	Rango estrecho
<b>Restart:</b>	Fichero de recuperación de datos
<b>Relap5/Mod3.2:</b>	Versión 3.2 de la familia de códigos de cálculo Relap5
<b>Relap5/Mod3.3:</b>	Versión 3.3 de la familia de códigos de cálculo Relap5
<b>SCRAM:</b>	Parada de emergencia del reactor nuclear
<b>SEN:</b>	<i>Secció d'Enginyeria Nuclear</i>
<b>Steam-dump:</b>	Sistema de descarga de vapor al condensador
<b>Trip:</b>	Variable lógica utilizada en los códigos de cálculo Relap5
<b>TBAAP:</b>	Turbobomba de agua de alimentación principal
<b>TBAAA:</b>	Turbobomba de agua de alimentación auxiliar
<b>UPC:</b>	<i>Universitat Politècnica de Catalunya</i>







## 2. Prefacio

### 2.1. Origen del proyecto

El origen del presente Proyecto Final de Carrera surge de una propuesta del *Grup d'Estudis Termohidràulics* de la *Secció d'Enginyeria Nuclear* de la ETSEIB (*Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona*) a raíz de un ejercicio comparativo previo entre los generadores de vapor de Ascó y Vandellós II cuyos resultados no fueron plenamente satisfactorios e indicaron un posible camino a seguir adecuado para ser la base de un PFC.

### 2.2. Motivación

La seguridad de las centrales nucleares es una de las áreas que más interesan en la explotación, por no decir la principal. Sobre este aspecto es necesario un gran nivel de trabajo en base a escenarios hipotéticos para la correcta preparación en caso de actuación. Estos escenarios hipotéticos se ejecutan sobre modelos de planta creados en el *Grup d'Estudis Termohidràulics* y deben dar un nivel de fiabilidad razonable para asegurar la validez de estos estudios.

El manual del código empleado para la simulación de estos transitorios proporciona recomendaciones para el desarrollo de modelos genéricos de componentes principales, tales como el generador de vapor, que no se han implementado en el modelo actual.

Este hecho es la base de la motivación del presente proyecto. Se pretende atender algunas de las recomendaciones sobre el generador de vapor para analizar si suponen una mejora en el modelo creado para las centrales de Ascó y Vandellós II.





### 3. Introducción

Los generadores de vapor pertenecen al circuito secundario y son sus únicos elementos en contacto con el primario. Las centrales de Ascó y Vandellós II constan de tres lazos y por tanto, de tres generadores de vapor, y son estos los que en operación normal extraen el calor producido en el núcleo del reactor. Es por esta razón que resultan unos elementos claves en la operación de la planta y es muy importante disponer de un modelo que produzca resultados que se ajusten razonablemente a la realidad.

Tras analizar los comportamientos dinámicos de los generadores de vapor de la CNA y la CNV II ante un rechazo de carga del 100 al 50 % parece razonable introducir mayor nivel de detalle en determinados modelos y analizar el control de la temperatura del agua de alimentación principal.

En el apartado 5.1.3 del volumen 5 del manual del código de cálculo RELAP5 [1] se ejemplifica un modelo del lado secundario del generador de vapor donde las estructuras de calor que representan la carcasa y la camisa del generador de vapor están incluidas. Los actuales modelos de generador de vapor de las centrales nucleares de Ascó y Vandellós II no incorporan tales estructuras y es por esta razón que se añadirán y se estudiará su influencia con dos transitorios accidentales.

En el apartado 5.1.2 del volumen 5 del manual del código de cálculo RELAP5 [1] se ejemplifica un modelo del lado primario del generador de vapor donde los miles de tubos en U se modelan como un único tubo en U equivalente. No obstante, se advierte que este modelo puede no ser suficientemente detallado para simular ciertos fenómenos de recirculación y grandes reducciones de los niveles del secundario. Se elaborará un nuevo modelo más detallado de los tubos en U y se hará un ejercicio comparativo en base a un transitorio donde estos fenómenos pueden ser relevantes.

#### 3.1. Objetivos del proyecto

Los objetivos del proyecto son por lo tanto realizar estos cambios en el modelo, cambios tanto hidráulicos como térmicos y/o de control, de los generadores de vapor de manera que el comportamiento se ajuste mejor a la realidad, o bien demostrar que el modelo actual es válido y correcto mediante varios transitorios accidentales donde la relevancia de los generadores de vapor cobre especial importancia.

El proyecto concluirá o bien con una mejora del modelo de generador de vapor o bien con la verificación de un grado de calificación suficiente.





## 4. Modelo de planta

### 4.1. Descripción del código de cálculo RELAP5/MOD3.2

RELAP5/MOD3.2 es un código informático utilizado para analizar transitorios en reactores de agua ligera y fue desarrollado en *Idaho National Engineering & Environmental Laboratory* (INEEL) por encargo de la *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (NRC) para su uso en la reglamentación, la concesión de licencias en auditorías de cálculos, la evaluación de las directrices del operador y como base para un analizador de plantas nucleares. Este código fue el elegido, en su momento, para desarrollar los modelos de planta de las centrales nucleares de Ascó y Vandellós II.

Es un código altamente genérico que además de calcular el comportamiento del sistema de refrigeración del reactor durante el transitorio puede ser utilizado para simular una gran variedad de transitorios termohidráulicos tanto en sistemas nucleares como no nucleares incluyendo mezclas de vapor, agua, gases no condensables y solutos. [2]

El programa incluye muchos modelos genéricos de los componentes de los sistemas generales que pueden ser simulados como por ejemplo bombas, válvulas, tuberías, calentadores eléctricos, secadores, separadores, acumuladores, turbinas... y el control de los componentes del sistema que incorpora funciones aritméticas, de integración y de derivación, proporcional-integrales, retraso y variables lógicas.

Los modelos de transferencia de calor describen los intercambios por conducción, convección y radiación entre las estructuras del sistema y el fluido.

El código resuelve las seis ecuaciones de conservación, de masa, energía y cantidad de movimiento para el agua y el vapor, y las concentraciones de solutos y gases no condensables. Además tiene un formato libre de entrada de datos, capacidad de obtención de gráficos y gran flexibilidad en la simulación de cualquier sistema termohidráulico.

El código recibe como entrada un fichero llamado *input* que contiene la descripción de la central nuclear que se quiere estudiar juntamente con las condiciones iniciales y de operación. El archivo *input* consta de cinco modelos: el hidrodinámico, el térmico, el cinético, el lógico y el de control. La información de salida se guarda en dos archivos de resultados, el archivo *restart* y el archivo *output*.

En el fichero *restart* la información se guarda en lenguaje máquina y por tanto el usuario no puede acceder de forma directa a los datos. Este fichero contiene la información sobre la evolución de todos los parámetros en el tiempo.



---

Con la ayuda de otro programa (*strip.exe*) se pueden extraer los resultados de las variables que interese estudiar en función del tiempo y graficarlas por ejemplo con el programa Excel. Este fichero también permite continuar la simulación a partir del instante final o de determinados momentos de un estacionario o transitorio calculado anteriormente.

En el fichero *output* se puede consultar la información de forma directa. El archivo empieza con el listado del fichero de entrada (*input*), a continuación aparece la *major edit* inicial seguida de las requeridas por el usuario y las que el código genera automáticamente. Las *minor edits* de las variables exigidas por el usuario y los mensajes de error que puedan ocurrir se añaden entre las *major edits*.

Una *major edit* contiene la información del cálculo distribuida en bloques. Empieza con el tiempo de la simulación en el que ha guardado los datos seguido de la información referente al paso de tiempo utilizado, el tiempo de la CPU, etc. A continuación ofrece el estado en que se encuentran todas las variables lógicas (*trips*) indicando si el *trip* es cierto o falso. Después se muestran todas las condiciones de todos los volúmenes hidrodinámicos, presiones, fracciones de vapor, temperaturas, densidades, velocidades, etc. Por último se encuentran las condiciones hidrodinámicas de las uniones, el estado del modelo de las estructuras de calor y las variables de control.

Una *minor edit* es un listado donde se encuentra el estado de todas las variables demandadas previamente por el usuario. Este listado se utiliza para obtener la información más importante de forma compacta y así facilitar el análisis de los resultados.



## 4.2. Descripción de los modelos de Ascó y Vandellós II

### 4.2.1. Introducción

Para representar la instalación real de la planta de Ascó se ha utilizado un modelo en continuo desarrollo realizado por la SEN para el código RELAP5/MOD3.2. [3]. Para el presente estudio se ha partido del modelo validado en Julio de 2003 al cual se le ha añadido el nuevo sistema de control de barras introducido por Bailo Callejon, M. en su PFC [4] para llevar a cabo simulaciones de transitorios con resultados próximos a la realidad.

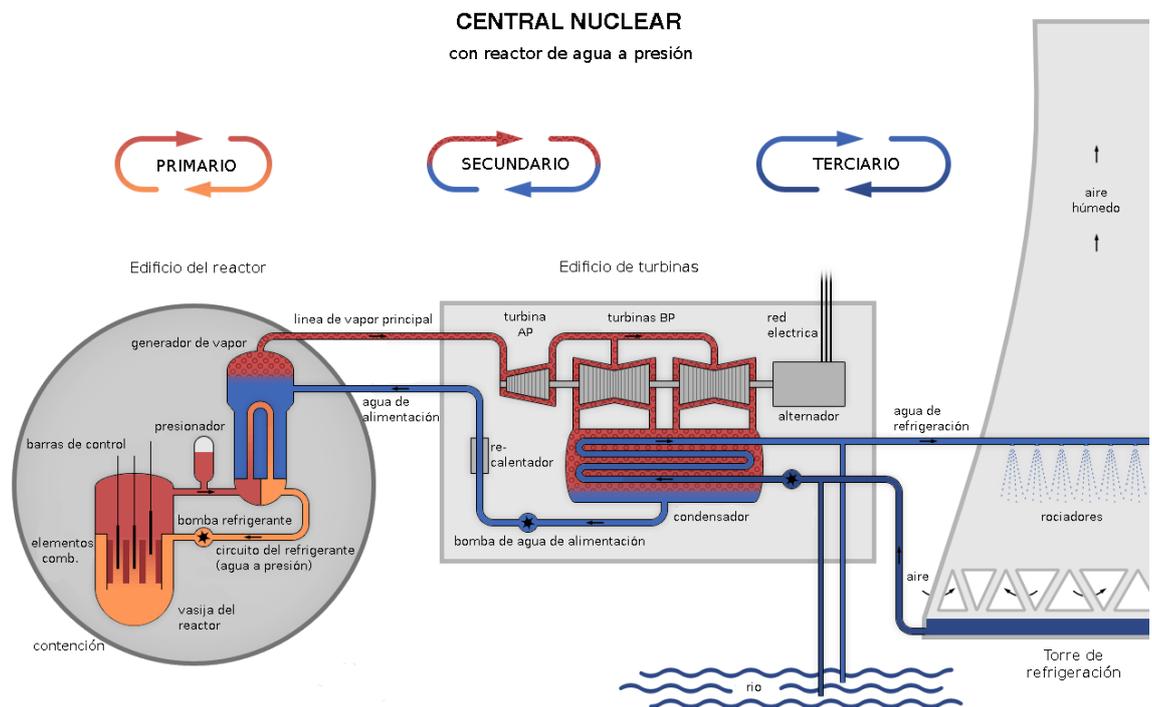


Figura 4.1: Esquema general de una central PWR. Fuente: Modificado de wikimedia.

Los reactores PWR como el de la central de Ascó o el de Vandellós II cuentan con varios circuitos. En el modelo utilizado algunos serán imprescindibles y deberán quedar bien definidos para acercarse a la realidad del funcionamiento mientras que otros podrán ser simplificados porque es su efecto sobre el comportamiento general de la planta el que toma importancia.

Se destacan cuatro categorías de sistemas: el reactor nuclear, los sistemas principales, los sistemas auxiliares y los sistemas de seguridad. A continuación se describen los sistemas que pertenecen al modelo RELAP5/MOD3.2, además de las simplificaciones respecto de la realidad.



### 4.2.2. Reactor nuclear

El reactor es el sistema donde tiene lugar la reacción nuclear. La fisión se inicia y se desarrolla en los elementos combustibles. Las barras de control sirven para regular la reacción, mientras que los sistemas de protección (barras de seguridad, inyección de agua borada...) son para detenerla. El moderador y el refrigerante captan y evacuan la energía producida en forma de calor. El reactor se coloca dentro de un recipiente llamado vasija.

Tanto el núcleo del reactor de la central nuclear Ascó como el de Vandellós II está compuesto por 157 elementos de combustible, con la forma estructural típica de los elementos de combustible para centrales de agua a presión PWR, con regiones de distinto grado de quemado y enriquecimiento.

Cada elemento de combustible está compuesto a su vez por 264 varillas de Zircaloy-4 llenas de pastillas combustibles de  $UO_2$ .

En el caso de un reactor PWR como el de Ascó o el de Vandellós II, el agua desempeña el papel de moderador y de refrigerante. La fisión produce neutrones de alta energía que colisionan con el hidrógeno del agua transmitiéndosela. También calienta los elementos combustibles y el elevado caudal de agua permite retirar el calor acumulado en las vainas. En funcionamiento normal la refrigeración se hace por convección forzada en las paredes de las barras.

La nodalización detallada del núcleo se divide en 11 volúmenes hidrodinámicos y se han simulado los denominados canal medio y canal caliente mediante las estructuras de calor de RELAP5. El canal medio se utilizará para simular la transferencia de calor de los elementos combustibles al refrigerante. El canal caliente se introduce con la finalidad de tener en cuenta la condición más limitativa para los análisis de seguridad en cuanto a calentamiento del núcleo del reactor (análisis de punto caliente).

Las limitaciones principales del modelo vienen referidas al uso de la cinética puntual y de daño severo al núcleo.

### 4.2.3. Sistemas principales

- **Circuito primario**

El circuito primario de la CNA consta de tres lazos para transportar el calor generado en el reactor. Cada uno incluye un generador de vapor, una bomba principal y tuberías que transportan el fluido refrigerante, a una presión de 157 bares, siempre en estado líquido.



La rama caliente conduce el agua desde la salida del núcleo hacia el generador de vapor a la salida del cual empieza la rama fría. La bomba principal se encarga de impulsar el agua hasta la entrada del núcleo. El presionador mantiene la presión en este circuito y se ubica en la rama caliente del primer lazo, próximo a la salida de la vasija del reactor. Es un circuito cerrado comportándose así como la segunda barrera de seguridad.

**Los generadores de vapor (GV)** son intercambiadores de calor encargados de refrigerar el circuito primario. El refrigerante circula a través de los tubos en U mientras que el agua del circuito secundario se convierte en vapor. El haz de tubos está modelado como un único tubo (*pipe*) de altura intermedia dividido en sub-volúmenes. La transferencia de calor se modela como una estructura de calor de RELAP5 cilíndrica con varios intervalos radiales entre la superficie interior y exterior del tubo en U. No contempla pérdidas de calor al exterior ni entre *downcomer* y *boiler*.

**Las bombas principales (BRR)** situadas en las ramas frías impulsan el refrigerante hacia el núcleo del reactor y se modelan como elementos bomba (*pump*) de RELAP5 indicando sus características.

**El presionador** es un volumen cilíndrico que contiene agua en fase líquida en su parte inferior, vapor en la parte superior y una zona de transición bifásica. Absorbe las variaciones de densidad del agua originadas por variaciones de potencia mediante calentadores y duchas de agua fría que proviene de los otros dos lazos controlando así el estado térmico del agua. También está unido a un tanque de alivio, a través de válvulas de seguridad y válvulas de alivio.

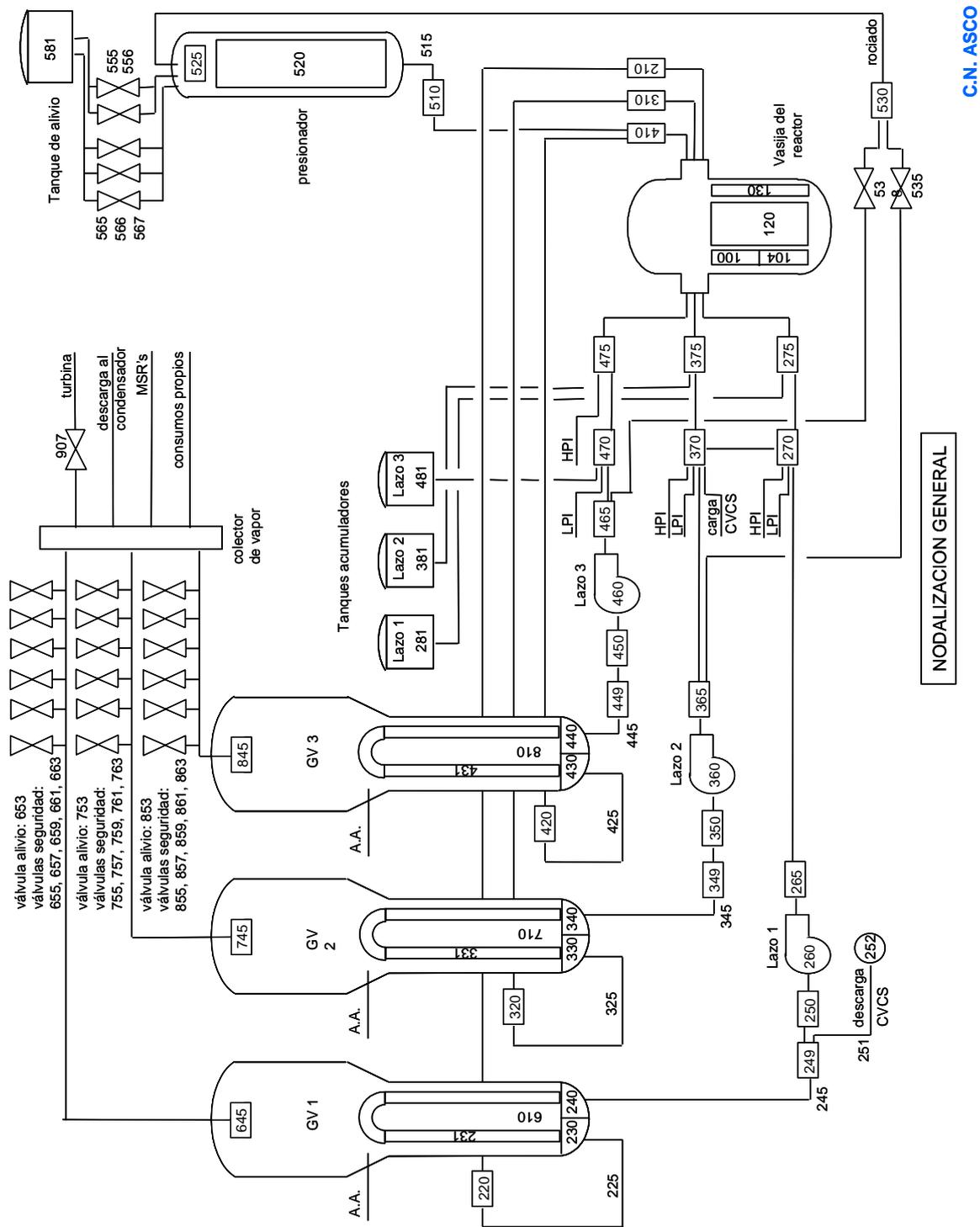
- **Circuito secundario**

El vapor producido en los generadores de vapor se conduce hasta el colector de vapor antes de expandirse en las turbinas de alta y baja presión. La turbina se representa como una condición de contorno y por tanto es el caudal de vapor el que determina la potencia generada.

Las válvulas de alivio y de seguridad, que se sitúan a la salida de los generadores de vapor permiten liberar el vapor a la atmósfera si fuera necesario. No se modelan el condensador, los secadores/re-calentadores ni el alternador.

A continuación se muestra, en la figura 4.2, la nodalización termo-hidráulica general de la planta de Ascó. En ella se puede observar de forma general los sistemas físicos modelados y el alcance del modelo.





C.N. ASCO

NODALIZACION GENERAL

Figura 4.2: Nodalización de la planta de Ascó.



- **Sistema de agua de alimentación principal (AAP)**

Está compuesto por dos turbobombas, alimentadas por parte del vapor extraído, que impulsan el agua desde el condensador hacia los generadores de vapor. El agua pasa a vapor gracias a la energía extraída del circuito primario, se expande en la turbina y vuelve al condensador completando así un circuito cerrado. En el modelo el agua proviene de tres volúmenes independientes y se regula el caudal mediante tres válvulas.

- **Circuito terciario**

Para licuar el agua en el condensador es necesario otro foco frío, que en el caso de la CNA es el agua procedente del río Ebro. Se dispone de dos baterías en paralelo de torres de refrigeración de tiro forzado y una torre de tiro natural que funcionan cuando el caudal del río no es suficiente para poder descargar el agua a la temperatura límite autorizada.

En la CNV II se utiliza para tal fin un emplazamiento marítimo, que proporciona una fuente inagotable de agua.

- **Sistemas de control y protección del reactor**

Permiten efectuar las medidas necesarias para asegurar la regulación del reactor y la seguridad durante su funcionamiento. Se destacan las medidas de flujo neutrónico, de temperatura, de presión, de nivel y de caudal. Por su construcción el código RELAP5 permite obtener el valor de cualquier parámetro físico que éste simula sin necesidad de indicar ningún dispositivo medidor o de detección.

#### **4.2.4. Sistemas auxiliares**

- **Sistema de control químico y de volumen (CVCS)**

Consta de dos tanques acumuladores, uno de ácido bórico y otro de agua desmineralizada, con los que se regula la concentración de boro en el refrigerante asegurando así su calidad. También se encarga de gestionar la carga y la descarga ajustando el volumen de agua contenida en el circuito primario. En la planta real, garantiza la alimentación de agua de sellado de las BRR. En el modelo el caudal de descarga es constante y se anula cuando el nivel del presionador es inferior al 15% mientras que el caudal de carga depende del nivel presionador.



- **Sistema de agua de alimentación auxiliar (AAA)**

Este sistema entra en funcionamiento en caso de fallo del circuito de AAP o en caso de parada del reactor. Consta de dos motobombas y una turbobomba y se modela de igual forma que el circuito de AAP.

#### **4.2.5. Sistemas de seguridad**

Se diseñan para hacer frente a los accidentes base de diseño y se han modelado los sistemas de refrigeración de emergencia del reactor, aunque en realidad existen sistemas de seguridad eléctrico y de la contención. El sistema de refrigeración de emergencia consta de tres circuitos para refrigerar el combustible en caso de LOCA (pérdida de refrigerante).

- **Acumuladores**

Son tanques a 45 bares de presión que entran en acción automáticamente en caso de una despresurización importante en el primario. Hay tres, uno por lazo, e inundan el reactor con grandes caudales de agua borada. Su acción se limita a su capacidad ( $41\text{m}^3$ ).

- **Circuito HPI**

El sistema HPI de inyección de alta presión impulsa agua desde el tanque de almacenamiento a las ramas frías mediante bombas de carga de alta presión. Por diseño, logra compensar pequeñas fugas, como la producida por la rotura de un tubo de un GV, que no suponen una importante bajada de presión. Por lo tanto, en el caso de LOCA grande no tendrá mucha influencia. En el modelo el agua de inyección proviene de un volumen autónomo y el caudal se calcula en función de la contrapresión en el punto de inyección.

- **Circuito LPI**

El sistema LPI de inyección de baja presión introduce agua en los tres lazos del primario (rama fría) a través de dos bombas de baja presión permitiendo la recirculación del agua cuando el tanque está vacío. Para simplificarlo en el modelo, el tanque se simboliza con un volumen autónomo y el caudal es constante ( $80\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  por lazo). La válvula se abre cuando la presión del presionador es inferior a 11 bares.



En resumen, los *inputs* de las C.N. de Ascó y Vandellós II constan de unas 17.000 y 15.000 líneas respectivamente donde se describen el número aproximado de elementos que se muestran en la siguiente tabla:

<b>Elementos</b>	<b>Nº de elementos en CNA</b>	<b>Nº de elementos en CNV II</b>
Volúmenes hidrodinámicos	549	613
Variables de control	1454	1327
Trips variables	219	234
Trips lógicos	431	461
Tablas	241	227
Variables interactivas	117	142

Tabla 4.3. Número de elementos de los modelos de planta de CNA y CNV II.

Incluyendo:

- Señales automáticas de instrumentación.
- Permisivos.
- Sistemas de protecciones y paradas de turbina y reactor.
- Sistemas de control.





## 5. Comparación entre los generadores de vapor de las C.N. Ascó y Vandellós II

### 5.1. Introducción

Como se ha comentado en el capítulo anterior, los modelos utilizados para la representación de las C.N. Ascó y Vandellós II se corresponden con los modelos validados en 2003 a los cuales se les ha incorporado el nuevo sistema de control de barras. Tras introducir cualquier cambio en el modelo se debe validar, en este caso con el transitorio de rechazo de carga del 100 al 50%, del cual se tienen valores reales medidos en las plantas tras las recargas de 1999 en las que se incrementó la potencia hasta 2900 MW.

Cabe notar que sobre el papel las instalaciones de Ascó y Vandellós II responden a un mismo diseño de principio, aún así, su comportamiento real presenta ciertas diferencias.

### 5.2. Rechazo de carga del 100 al 50%

El transitorio de rechazo de carga de turbina del 100 al 50 % es de los más interesantes para comprobar y validar el modelo de planta para transitorios operacionales [5] [6] ya que es un transitorio complejo en el que intervienen simultáneamente y juegan un papel fundamental:

- Cinética
- Modelos termohidráulicos de:
  - Generadores de vapor (pérdidas de carga, transferencia de calor...).
  - Sistema de descarga al condensador.
  - Válvulas de alivio de los generadores de vapor.
  - Sistema de agua de alimentación principal.
  - Sistema de control de nivel del presionador.
- Modelos de sistemas de control de:
  - Control de barras.
  - Control de sistema de descarga al condensador.
  - Control de nivel del presionador.
  - Control de presión del presionador.
  - Control de las válvulas de agua de alimentación principal.
  - Control de la velocidad de las turbobombas de AAP.

Y el comportamiento de cada uno de ellos afecta a todos los demás.



Globalmente los resultados obtenidos tras la simulación del rechazo de carga con la versión actual del modelo son correctos (se pueden encontrar en el anexo A de este capítulo) aunque se puede observar una pequeña discrepancia entre el rango estrecho calculado y el medido en la realidad para la central de Ascó mientras que el modelo del generador de vapor de Vandellós II se ajusta satisfactoriamente a la realidad.

El rango ancho mide el nivel de agua líquida en el generador de vapor y se calcula a partir de la diferencia de presiones entre medidores, que se encuentran en la base y en el domo del generador de vapor. El rango estrecho es el nivel de agua líquida que existe entre un medidor intermedio, situado a la altura de la entrada del AAP, y el superior. Tanto el rango estrecho como el rango ancho se expresan en tanto por cien. Los medidores en Ascó y Vandellós II no están separados de igual forma, en parte debido a la diferencia de alturas entre ambos generadores de vapor. Esta es la razón por la cual, los niveles mínimos y máximos alcanzados tras el rechazo de carga del 100 al 50% no son iguales.

A continuación se muestran los niveles de rango estrecho para la central nuclear de Ascó y para la central nuclear de Vandellós II.

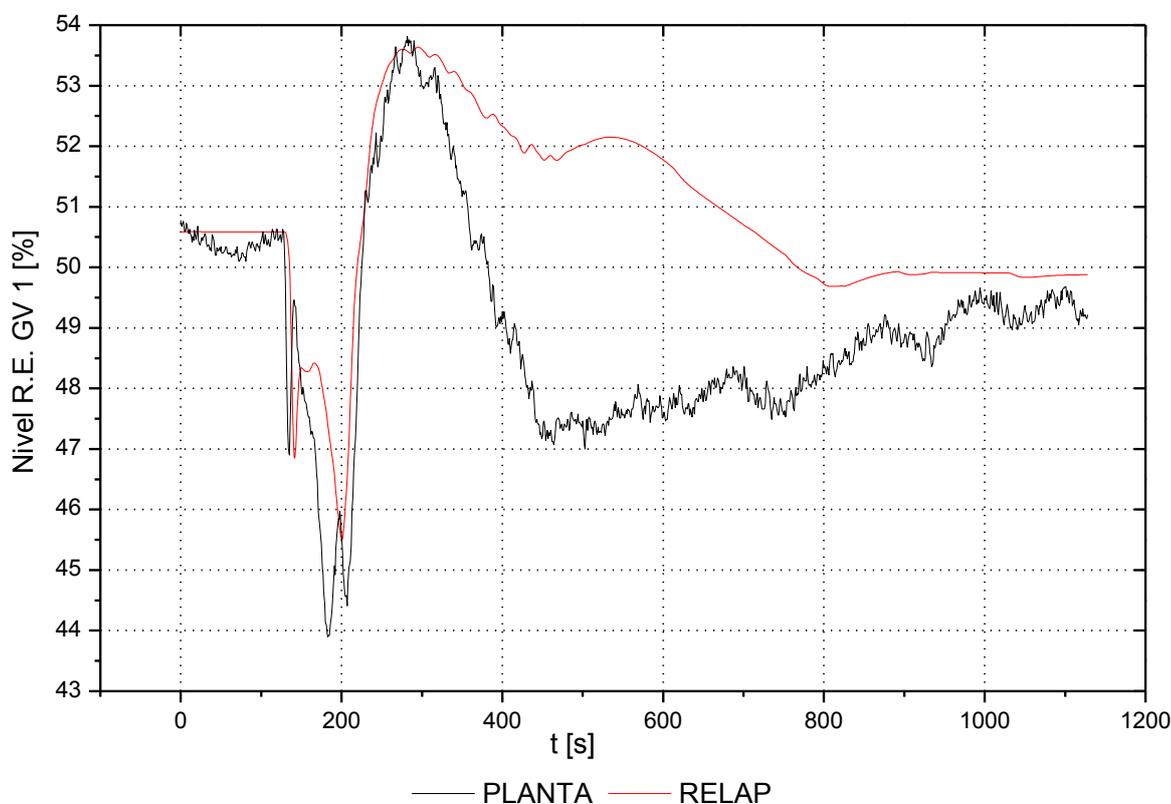


Figura 5.1: Rechazo de carga del 100% al 50% CNA: Nivel rango estrecho en el GV 1.



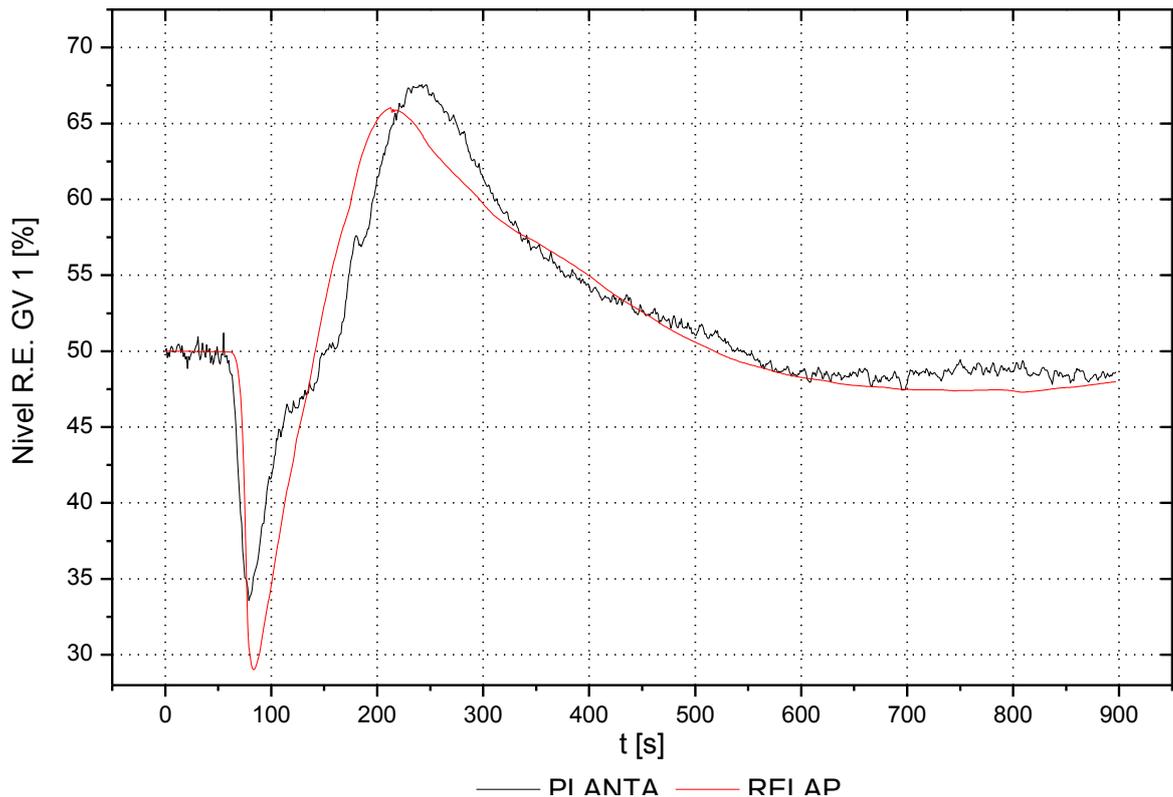


Figura 5.2: Rechazo de carga del 100% al 50% CNV II: Nivel rango estrecho en el generador de vapor 1.

Se pretende descubrir cual es la razón por la cual el RE de la CNA no se ajusta a la realidad. Para empezar se ha comprobado que la manera de calcular los diámetros hidráulicos de los tubos en U y los niveles de rango ancho y estrecho de los generadores de vapor de Ascó y Vandellós II fuese correcta con la finalidad de encontrar la fuente de la discrepancia entre el nivel calculado y el nivel medido en la planta de Ascó.

Ésta es la razón por la cual se decide hacer un análisis comparativo entre las nodalizaciones de los generadores de vapor de Ascó y de Vandellós II y se estudia la influencia de la temperatura del agua de alimentación principal sobre el nivel de rango estrecho modificando los parámetros ficticios de control que la definen.

La nodalización hidrodinámica incluye las características geométricas de cada elemento (superficies de flujo o volúmenes, longitudes, coeficientes de pérdidas de carga, rugosidad, etc.), al igual que las condiciones iniciales (temperaturas, presiones, caudales, concentraciones de boro...) y quedan definidas en el modelo RELAP5 que ha servido de base a la realización del modelo de este proyecto.

A continuación se muestran las cronologías de los transitorios.



<b>TIEMPO ( SEGUNDOS )</b>	<b>EVENTO</b>
128	Rechazo de carga del 100% al 50%
133	Inicio inserción de barras a ritmo máximo.
188	Final inserción de barras a ritmo máximo.
492	Velocidad de barras nula.
271	Potencia de la turbina al 47,5%.
1128	Final del transitorio.

Tabla 5.3: Cronología del transitorio de rechazo de carga del 100% al 50% para la CNA.

<b>TIEMPO ( SEGUNDOS )</b>	<b>EVENTO</b>
59	Rechazo de carga del 100% al 50%
63	Inicio inserción de barras a ritmo máximo.
124	Final inserción de barras a ritmo máximo.
303	Velocidad de barras nula.
271	Potencia de la turbina al 48,8%.
900	Final del transitorio.

Tabla 5.4: Cronología del transitorio de rechazo carga del 100% al 50% para la CNV II.

### 5.2.1. Documentación

- **Referencias**

Nota de cálculo del modelo de la C.N. Ascó para el programa RELAP5/MOD3. Marzo 2003.

NUREG/CR-5535-V2 (INEL-95/0174) "RELAP5/MOD3 code manual". Juny 1995.

Diagramas lógicos y de nodalitzación de la C.N. Ascó. Marzo 2003.

- **Archivos**



<b>NOMBRE</b>	<b>CONTENIDO</b>
BOL-ANA1008.inp	Modelo de la planta de Ascó (estacionario).
BOL-CNV0908.inp	Modelo de la planta de Vandellós II (estacionario).
reduc_ANA.rst	Ficheros de resultados del estacionario.
reduc_CNV.rst	
BF-TRAN-CNA.inp	Fichero de entrada del transitorio para la CNA.
TRAN-3-CNV.inp	Fichero de entrada del transitorio para la CNV.
BF-TRAN-CNA.out	Fichero de salida del transitorio para la CNA.
TRAN-3-CNV.out	Fichero de salida del transitorio para la CNV.
BF-TRAN-CNA.rst	Fichero de resultados del transitorio para la CNA.
TRAN-3-CNV.rst	Fichero de resultados del transitorio para la CNV.
VAL.opj	Gráficos de los strips.

Tabla 5.5: Archivos generados para el estudio previo del rechazo de carga del 100 al 50 %.



### 5.3. Comparación entre generadores de vapor

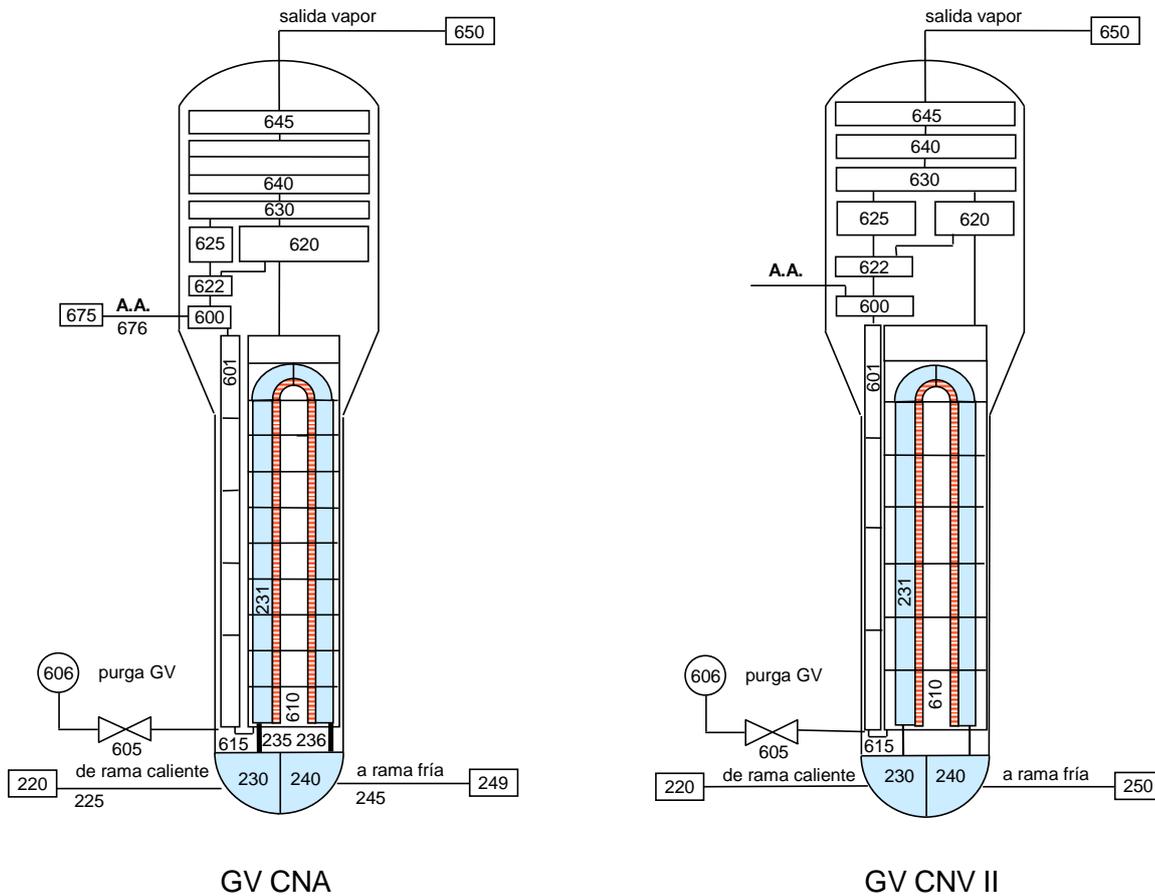


Figura 5.6: Nodalizaciones del generador de vapor 1 de la CNA y de la CNV II.

#### LADO SECUNDARIO:

En el circuito secundario de los generadores de vapor se modelan los siguientes elementos desde la entrada del agua de alimentación:

- Anillo de distribución del agua de alimentación.
- *Downcomer*.
- *Boiler*.
- Tubos turboseparadores.
- Secadores y domo.

El secundario del generador de vapor está formado por una carcasa que actúa de barrera de presión alrededor del haz de tubos y de una zona superior que aloja el equipo de separación de humedad del vapor. El agua de alimentación entra a través de la tobera de agua de alimentación (nodo 600) y se vierte uniformemente desde la parte alta del anillo de alimentación, por la región denominada *downcomer* o bajante (nodo 601).



El calor transferido por el agua de refrigeración del reactor, a través de los tubos en U, eleva la temperatura del secundario hasta la saturación, a lo largo de la región denominada *boiler* (nodo 610) dividido en 8 subvolúmenes en el caso de la CNV II y de 11 en el caso de la CNA. Se produce así vapor con un elevado contenido de humedad que posteriormente pasa por una serie de turboseparadores y secadores cuyo objetivo es mejorar su calidad.

El nodo 620 corresponde a la zona superior de los turboseparadores donde se encuentra la turbohélice y el agua separada del vapor retorna al nodo 622 a través del nodo 625 que corresponde a la zona exterior de los tubos de los turboseparadores. Este retorno conforma el caudal de recirculación que se mezclará con el agua de alimentación principal.

El caudal de vapor que continua su recorrido ascendente circula a través de los secadores, nodos 630 (parte exterior y de retorno a través de los nodos 625 y 622) y 640 (parte interior) dividido en 3 subvolúmenes en la CNA y en 1 en la CNV II. El vapor secado circula por la región denominada domo (nodo 645) antes de salir a la tobera de vapor principal.

#### **LADO PRIMARIO:**

El primario del generador de vapor tiene un fondo hemisférico dividido en dos mitades por una placa. El refrigerante del reactor entra en una de las mitades (nodo 230) pasa a través del tubo en U (nodo 231) y vuelve a la otra mitad (nodo 240). Están definidos como *branch* en la CNV II y como *snglvol* unido al nodo 231 mediante una *sngljun* en la CNA. El nodo 231 es una *pipe* y está dividido en 20 subvolúmenes en Ascó y 14 en Vandellós II.

Los generadores de vapor de la CNA constan de 5.130 tubos de 16,87 mm y 19,05 mm de diámetro interior y exterior respectivamente. En la CNV II de 5.626 tubos de 15,44 mm y 17,46 mm.

Las configuraciones de los tubos son al tresbolillo en el caso de la central nuclear de Ascó y en malla cuadrada en la central nuclear de Vandellós II. No obstante la nodalización en ambos casos se corresponde con un único tubo en U (nodo 231) con un área de paso y longitud equivalente a la suma total de los miles de tubos.

La decisión de modelar de esta manera los tubos en U tiene su fundamento en la simplicidad y ha demostrado ser perfectamente válida para un amplio espectro de transitorios operacionales. No obstante esto permite concebir y ensayar modelos más detallados con la intención de identificar posibles mejoras.

En cuanto al modelo térmico responsable de los mecanismos de transferencia de calor, consta de una única estructura de calor correspondiente al tubo en U y por lo tanto solo contempla transferencia primario/secundario.



### 5.4. Influencia de la temperatura del AAP sobre el nivel de rango estrecho

La temperatura del agua de alimentación está definida como una tabla en función de la potencia de la turbina, a la cual se le aplica un *delay* y un *lag*. Esto es debido a que el sistema turbina condensador no está definido al detalle en el modelo ya que es el comportamiento general de este sistema el que toma importancia. En la figura 5.4 se muestran los parámetros ficticios de control de la T<sup>a</sup> de AAP (variable de control C-3810).

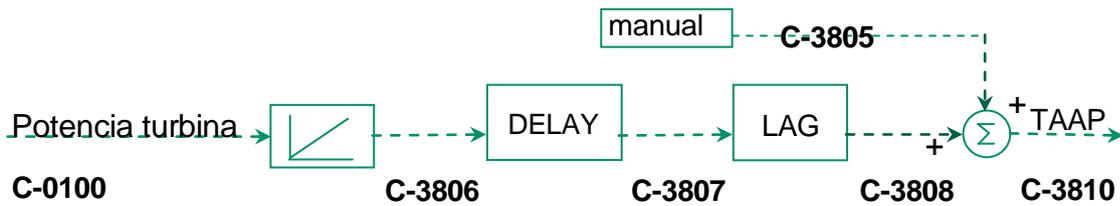


Figura 5.7: Esquema de funcionamiento del sistema turbina-condensador de la CNA.

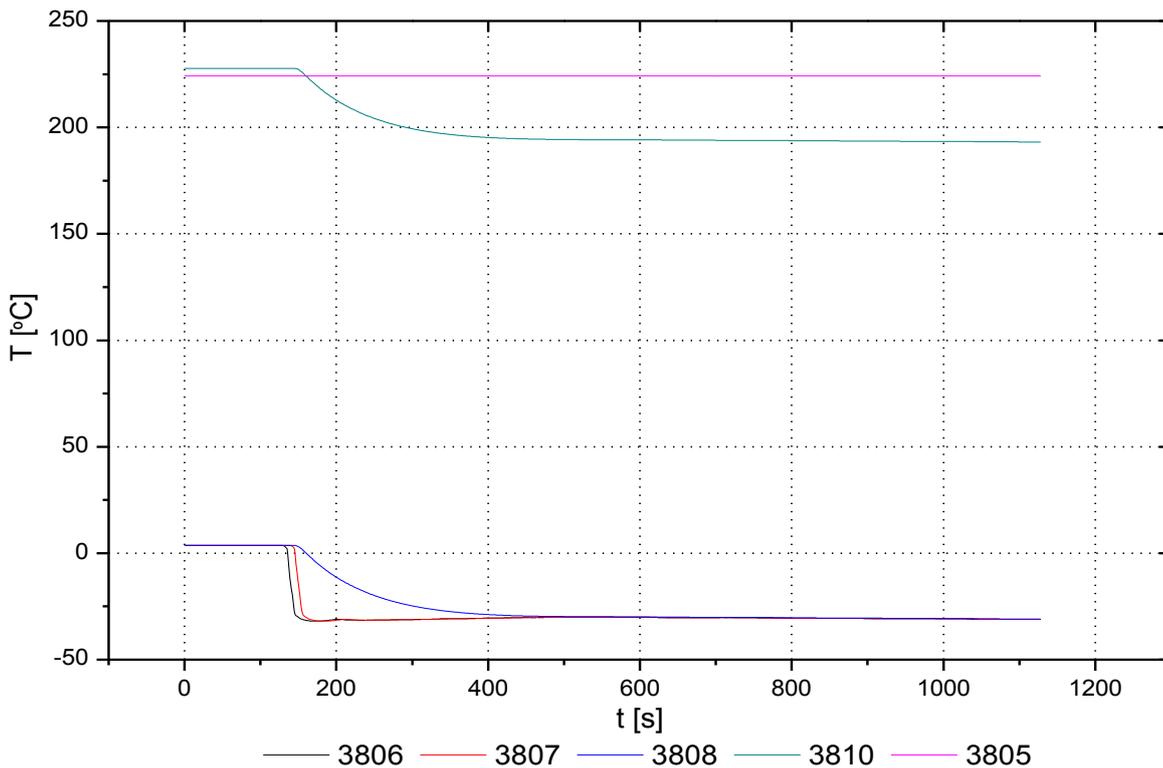


Figura 5.8: Cálculo de la temperatura del AAP en la CNA.

Así pues, se pretende analizar el efecto de la temperatura sobre el nivel de rango estrecho de los generadores de vapor. Para ello se analizarán los casos extremos que se pueden percibir en la figura 5.8. En primer lugar se supone una temperatura constante de 227,75 °C y en segundo lugar no se aplica *delay* ni *lag*. Los resultados se muestran a continuación.



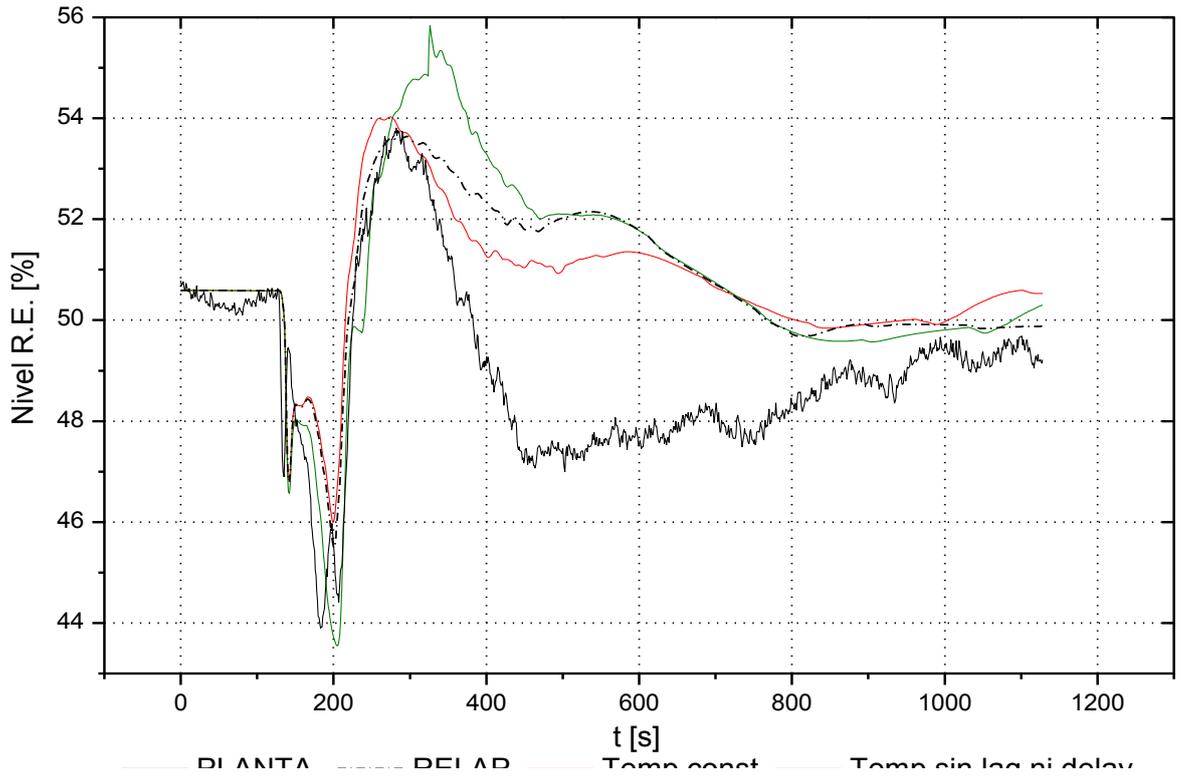


Figura 5.9. Rechazo de carga del 100 % al 50 %: Nivel R.E. del generador de vapor 1.

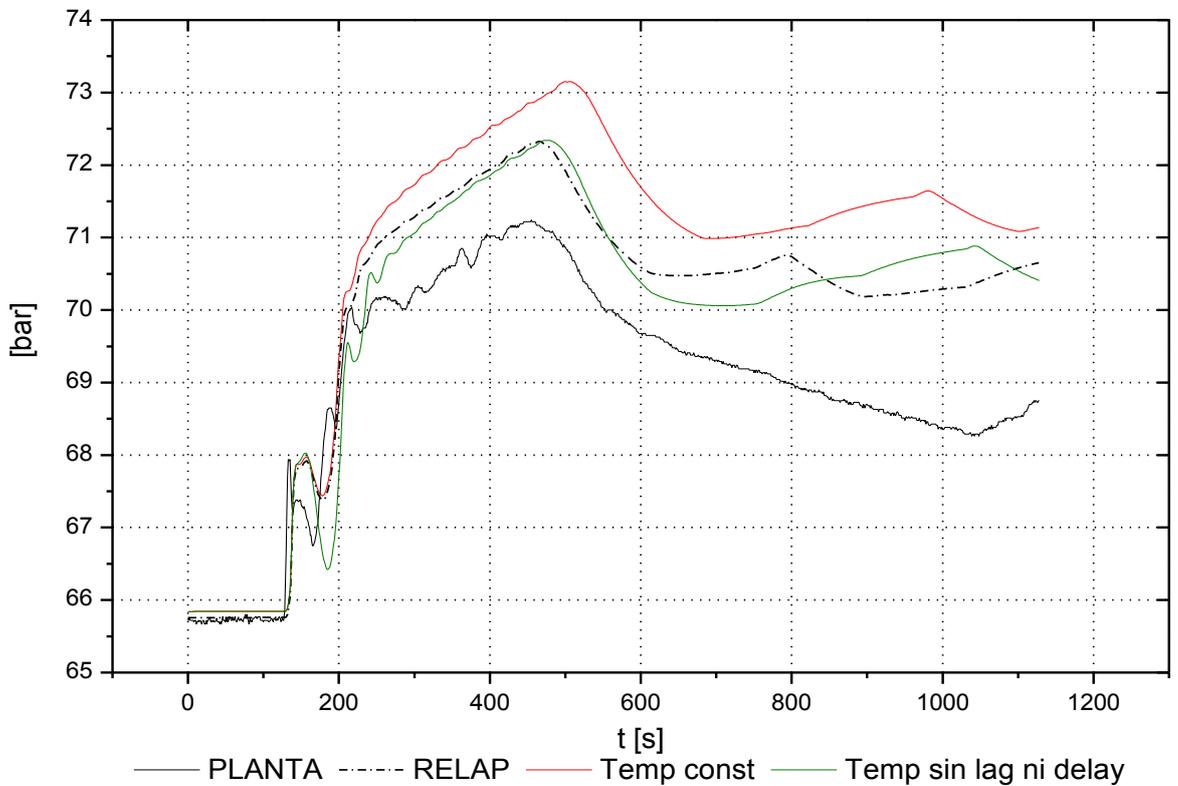


Figura 5.10. Rechazo de carga del 100 % al 50 %: Presión en el secundario.



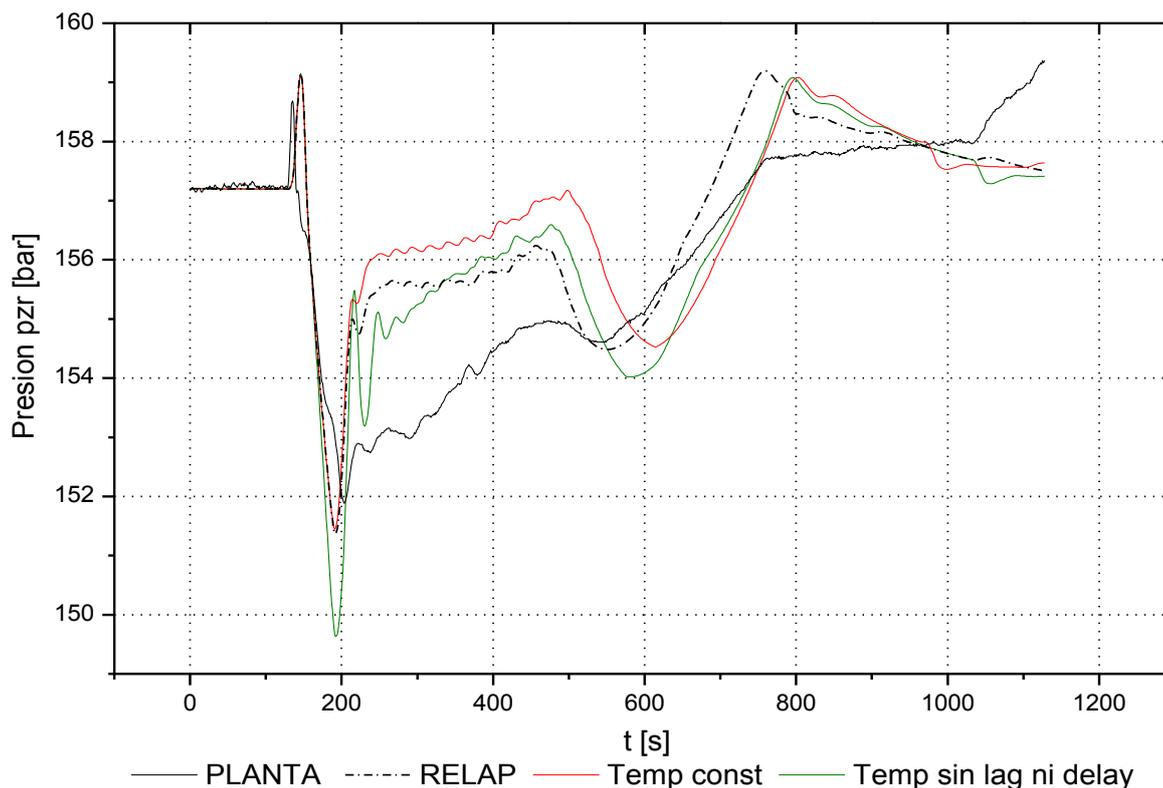


Figura 5.11. Rechazo de carga del 100 % al 50 %: Presión en el presionador.

Se debe notar que aunque estas dos situaciones no son posibles físicamente nos permiten explorar el comportamiento límite de la variable a estudiar, la temperatura del agua de alimentación principal.

Se observa en las figuras 5.9 - 5.11 que suponer una temperatura alta y constante facilita la vaporización del agua disminuyendo así el nivel de rango estrecho del generador de vapor, lo que se traduce en presiones más elevadas en el secundario y en última instancia en el primario debido al descenso en la transferencia de calor. Además, se debe tener en cuenta que la masa total de agua introducida en el GV es menor por efecto del descenso de su densidad. No obstante se observa que el nivel de rango estrecho, aunque mejora, difiere significativamente del comportamiento de la planta.

Por otra parte, si postulamos una caída de temperatura instantánea, sin *delay* ni *lag*, obtenemos los efectos contrarios alcanzándose mayor similitud con el comportamiento de planta en lo que respecta a presiones, divergiendo en cuanto al nivel de rango estrecho.

En cualquier caso las diferencias son suficientemente notables como para asegurar que otras soluciones intermedias no van a producir resultados sorprendentemente parecidos a la realidad. Parece indicar pues que la discrepancia entre los datos simulados y los reales no es eliminada tan solo ajustando la temperatura del agua de alimentación principal.



## 6. Influencia de las estructuras de calor en la camisa y carcasa de los generadores de vapor.

### 6.1. Introducción

Se pretende analizar la influencia de incorporar dos nuevas estructuras de calor en los generadores de vapor con tal de modelar la transferencia de calor entre el *downcomer* y el *boiler* (camisa) y entre la carcasa y el agua durante los transitorios.

La estructura de la carcasa se ha dividido en tres zonas, la zona troncocónica, la zona gruesa y la zona inferior. La zona troncocónica se ha modelado como un cilindro manteniendo la altura y el diámetro exterior e interior de éste se han calculado conservando el área de transferencia de calor y la masa del troncocono.

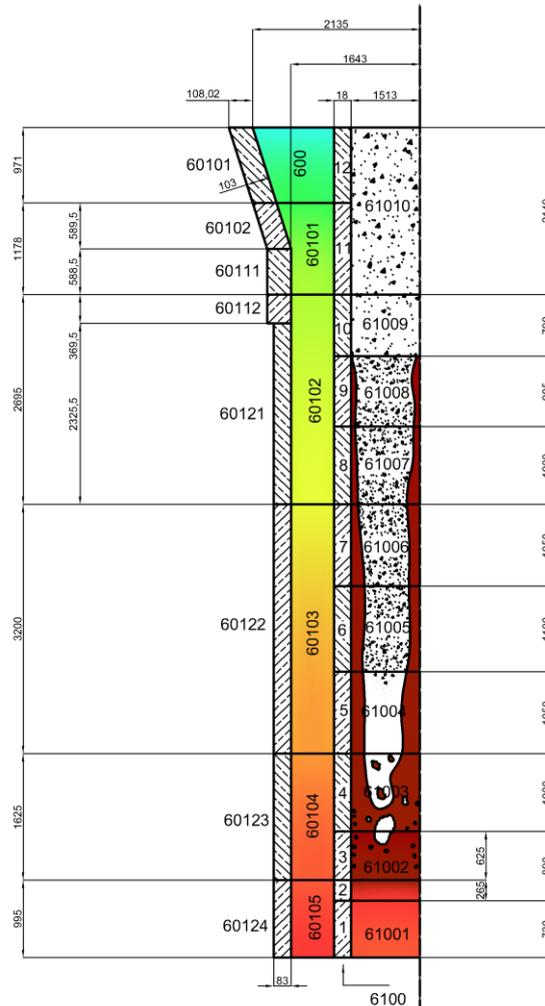


Figura 6.1: Nueva nodalización para el generador de vapor 1 de la CNA



Para ello se simularan dos transitorios accidentales, la pérdida de suministro eléctrico exterior y la pérdida total de agua de alimentación con recuperación del foco frío.

## 6.2. Pérdida de suministro eléctrico exterior

### 6.2.1. Descripción del transitorio

La secuencia empieza con el reactor trabajando en operación normal al 100 % de potencia después de 12.000 segundos de transitorio nulo. La cinética es la correspondiente al ciclo 13 en condiciones BOL. En este punto la central pierde el suministro exterior de energía eléctrica provocando la caída de las barras de control (SCRAM) que detienen el reactor inmediatamente, seguido por la turbina para garantizar su seguridad (figura 6.2).

El núcleo del reactor continúa generando calor debido a la desintegración de los productos de fisión y de activación. Este calor debe extraerse a través de los generadores de vapor por circulación natural del refrigerante, ya que las BRR han dejado de girar (figura 6.3).

Los generadores diesel de emergencia, siempre a punto para su puesta en marcha, se conectan correctamente para suministrar la energía necesaria a los sistemas auxiliares y de protección y llevar así la planta a parada segura sin complicaciones

Desde el punto de vista del secundario se detiene la entrada de agua de alimentación principal y se pone en marcha el agua de alimentación auxiliar (AAA) impulsada por las motobombas y la turbobomba los primeros segundos y por las motobombas el tiempo restante del transitorio (figura 6.4). El vapor generado se envía a la atmósfera, ya que el condensador no está disponible, mediante la apertura de la válvula de alivio (figura 6.5).

Los calentadores del presionador tampoco están disponibles y se regula el caudal de entrada del AAA a los generadores de vapor con el fin de mantener el nivel de rango estrecho próximo al 50 % (figura 6.6). Esta regulación supone un proceso clave para llevar el reactor a parada segura, encargándose de estabilizar la presión y la temperatura del refrigerante (figuras 6.7 y 6.8).

Este transitorio parece indicado para analizar la influencia de estas estructuras. La entrada de AAA a una temperatura muy inferior a la de la pared interior del generador de vapor provoca una transferencia de calor no considerada con la nodalización anterior. Se estudiará la influencia de la estructura carcasa por sí sola y de ambas estructuras simultáneamente (carcasa y camisa).

A continuación se muestra la evolución en el tiempo de algunas de las variables más significativas ante un transitorio de pérdida de suministro eléctrico.



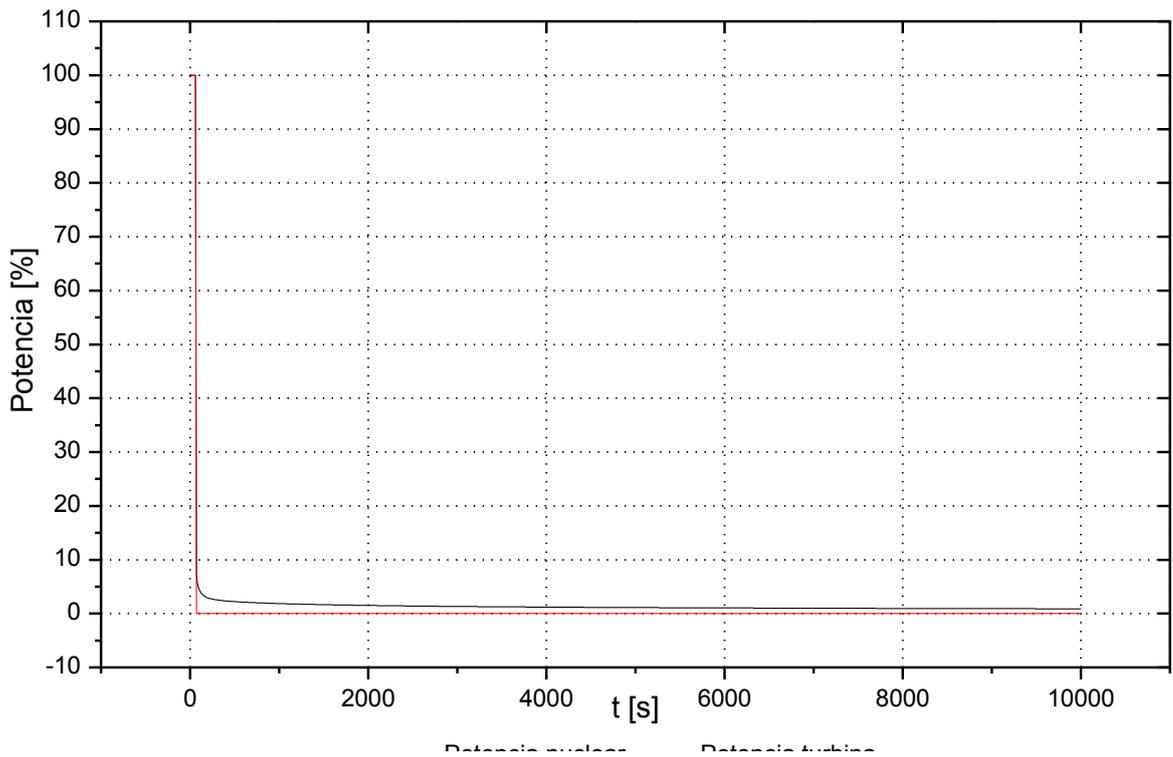


Figura 6.2. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Potencia nuclear y de la turbina.

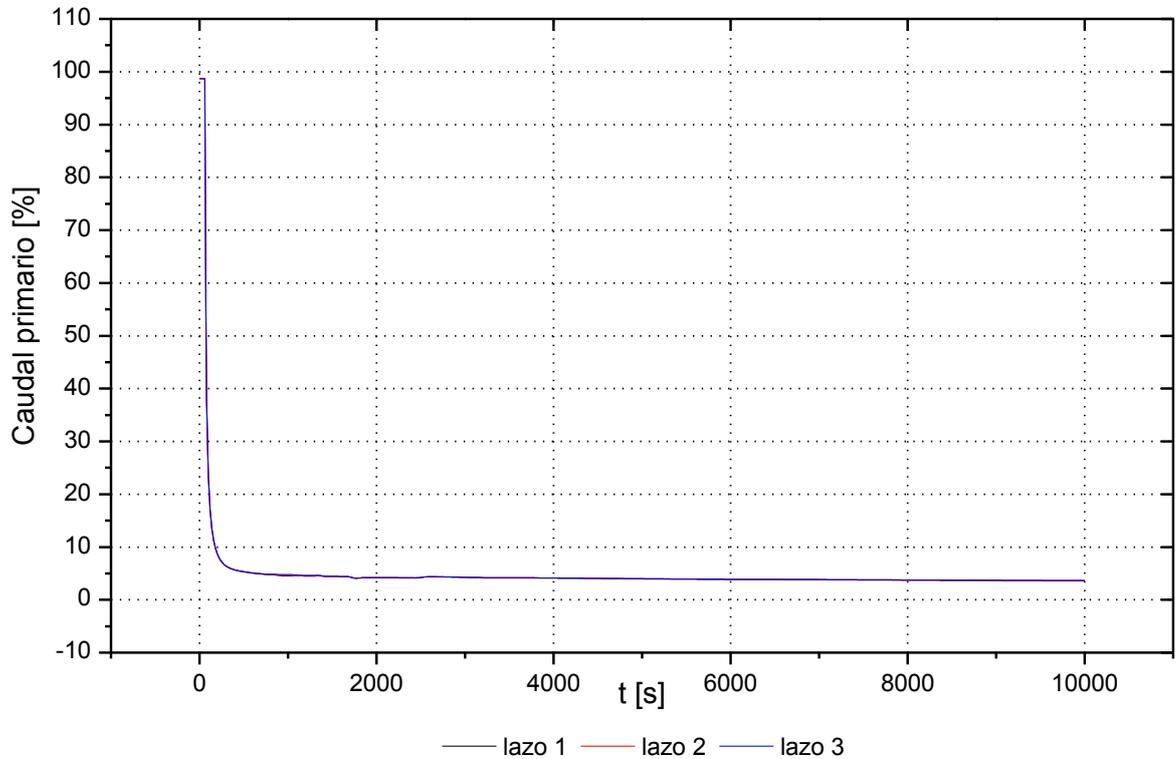


Figura 6.3. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Caudal por cada lazo del primario.



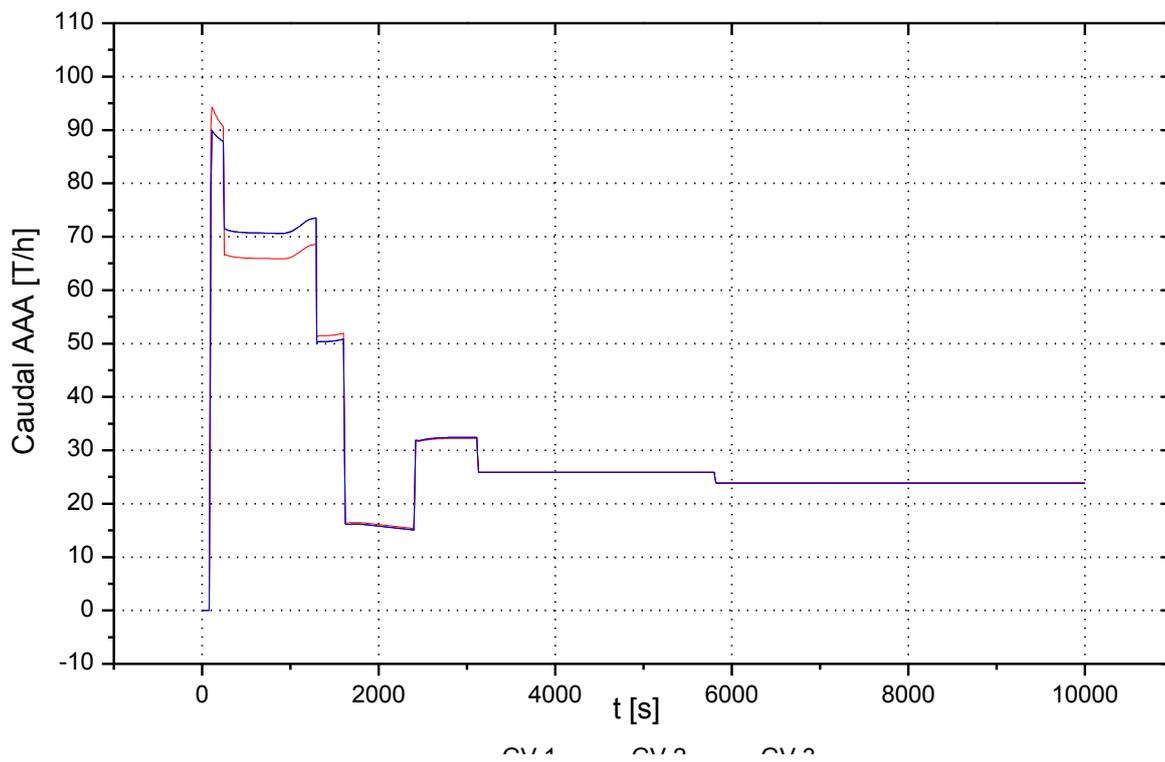


Figura 6.4. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Caudal AAA a cada G.V.

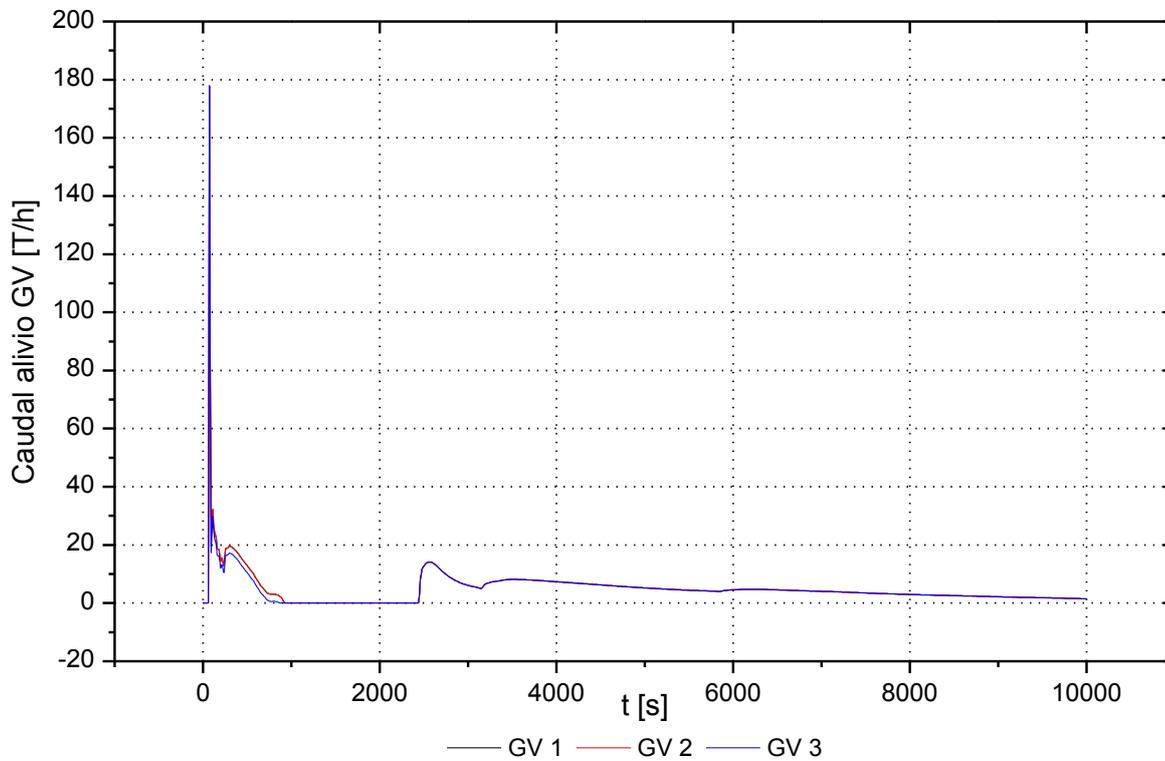


Figura 6.5. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Caudal de alivio de los G.V.



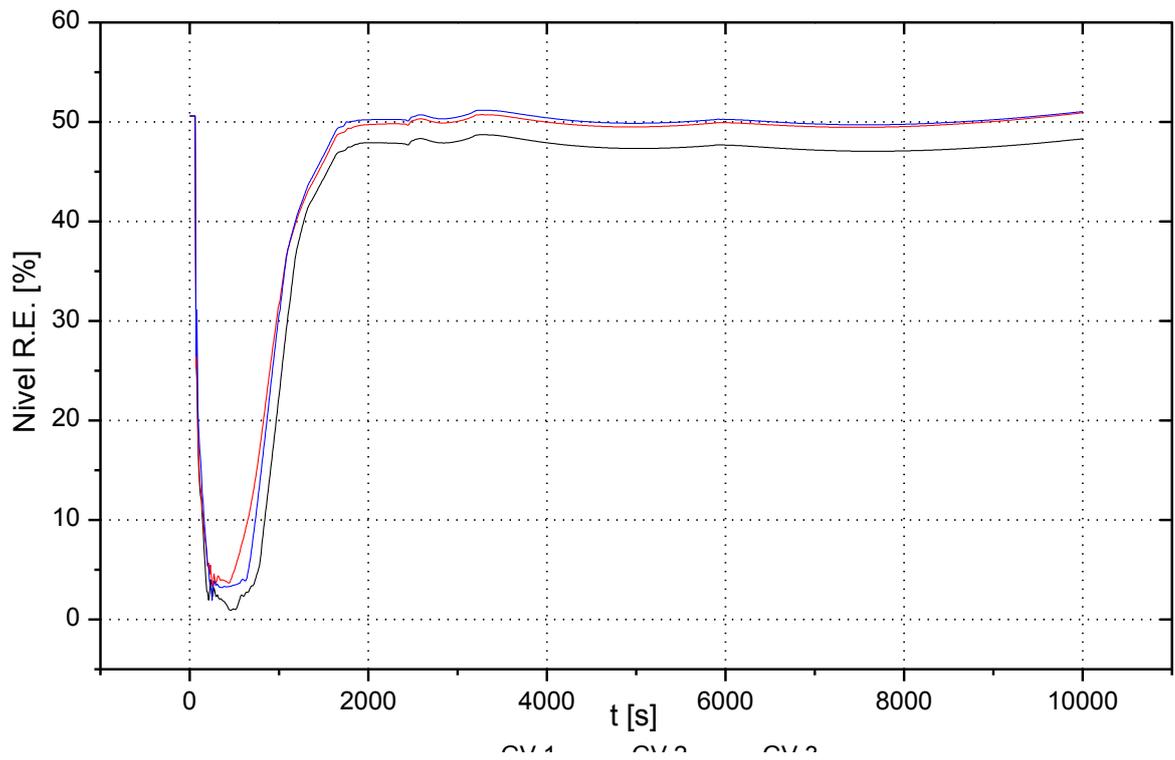


Figura 6.6. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Nivel de R.E. de los G.V.

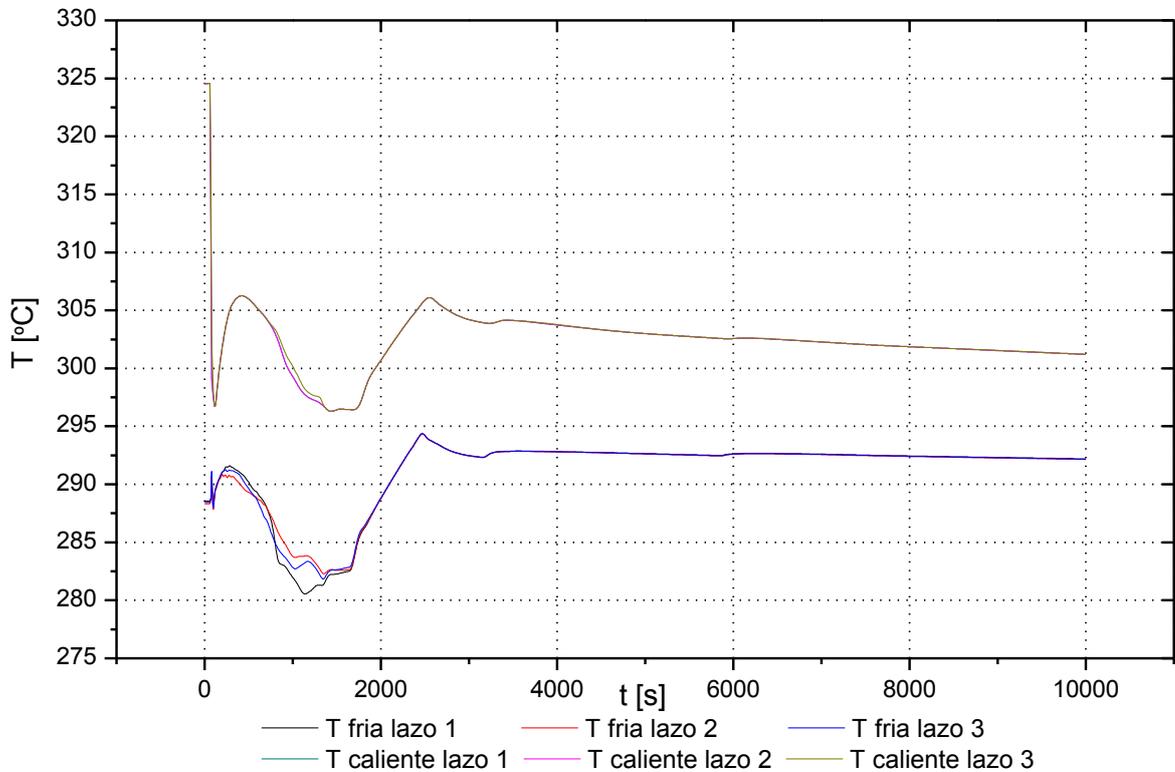


Figura 6.7. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Temperatura frías y calientes.



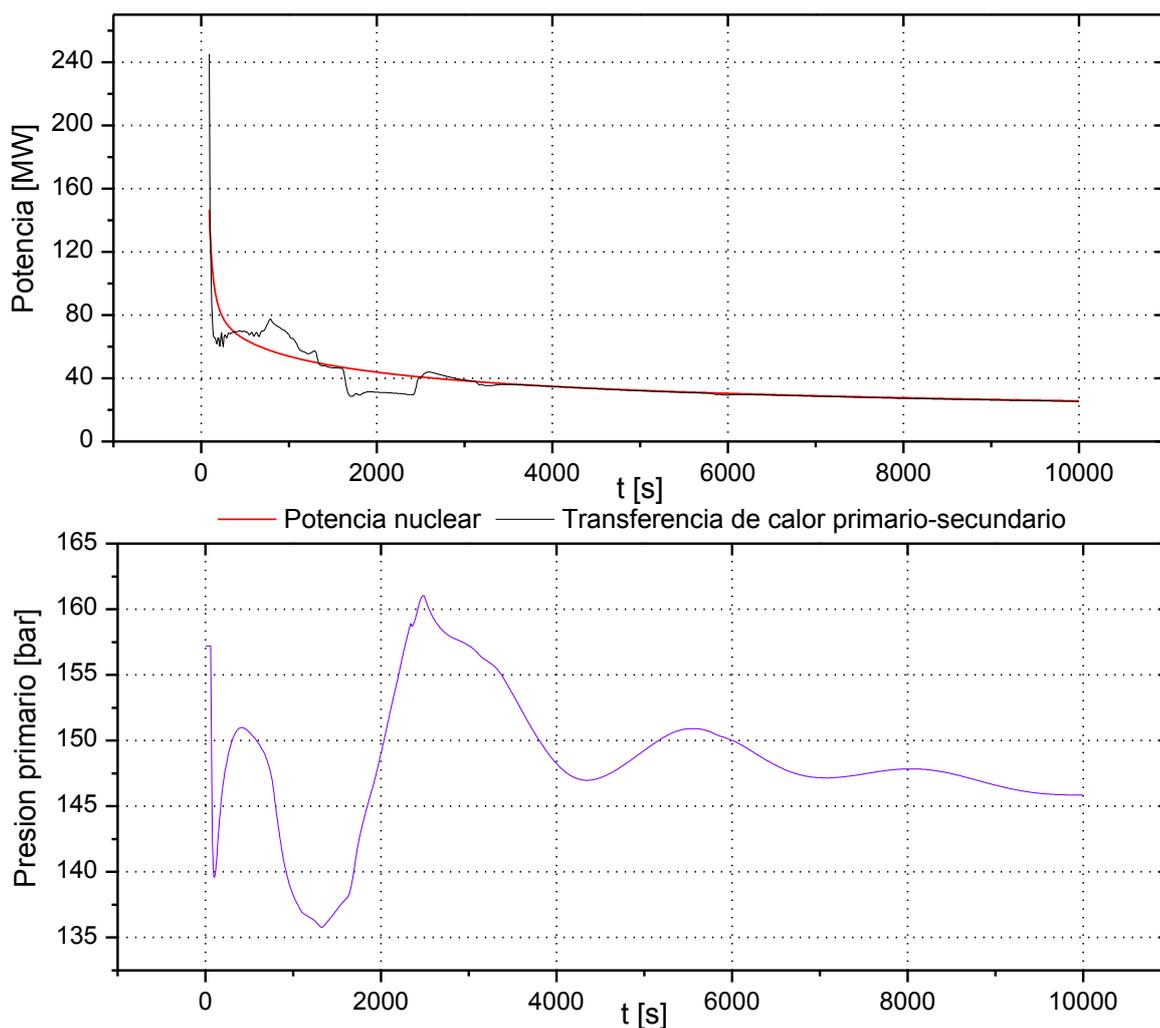


Figura 6.8. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Transferencia de calor primario-secundario vs Presión en el presionador.

Los calentadores del presionador no están disponibles tras una pérdida de suministro eléctrico exterior, por tanto la regulación del caudal de AAA cobra un peso importante en la regulación de la presión en el primario y las temperaturas frías y calientes de los tres lazos.

Generalmente un aporte excesivo de agua de alimentación auxiliar en los generadores de vapor provoca una transferencia de calor primario-secundario superior a la potencia nuclear residual generada en el reactor y en consecuencia una disminución de presión en el primario. Si la transferencia de calor primario-secundario es inferior a la potencia nuclear, la presión en el presionador aumenta.

Igualar estas dos potencias mediante cambios discretizados en el caudal de AAA es difícil, por esto la presión en el primario oscila ligeramente. Una mala regulación provocaría oscilaciones fuertes de la presión.



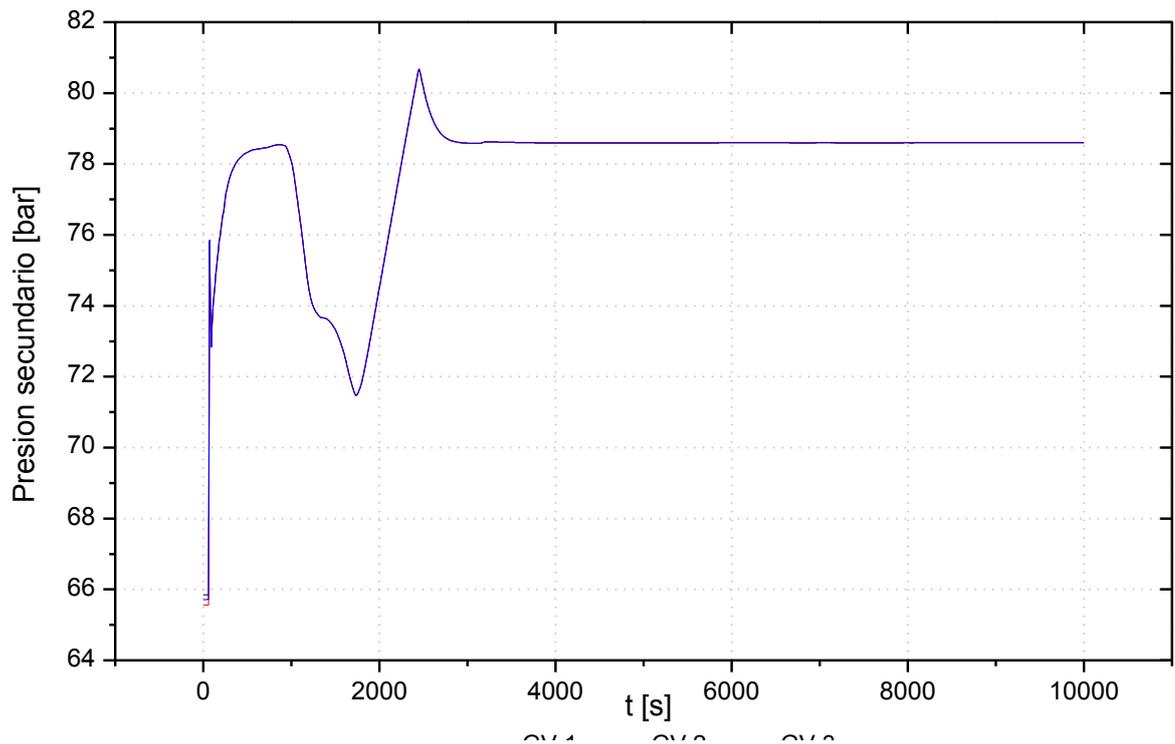


Figura 6.9. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Presión del secundario.

Las variaciones de presión en el secundario provocan la apertura y el cierre de la válvula de alivio de los generadores de vapor.

En la tabla 6.10 se muestra la cronología del transitorio:

TIEMPO ( SEGUNDOS )	EVENTO
60	Pérdida de suministro eléctrico exterior.
240	Abrir interconexiones AAA.
240	Parada TBAAA.
1290	Regular caudal AAA.
10000	Fin del transitorio.

Tabla 6.10 Cronología del transitorio de pérdida de suministro eléctrico exterior.

A continuación se muestran los resultados obtenidos considerando la estructura de calor de la carcasa (rojo), la camisa y la carcasa simultáneamente (verde) y se realiza la comparativa entre los resultados obtenidos.



### 6.2.2. Comparativa de resultados

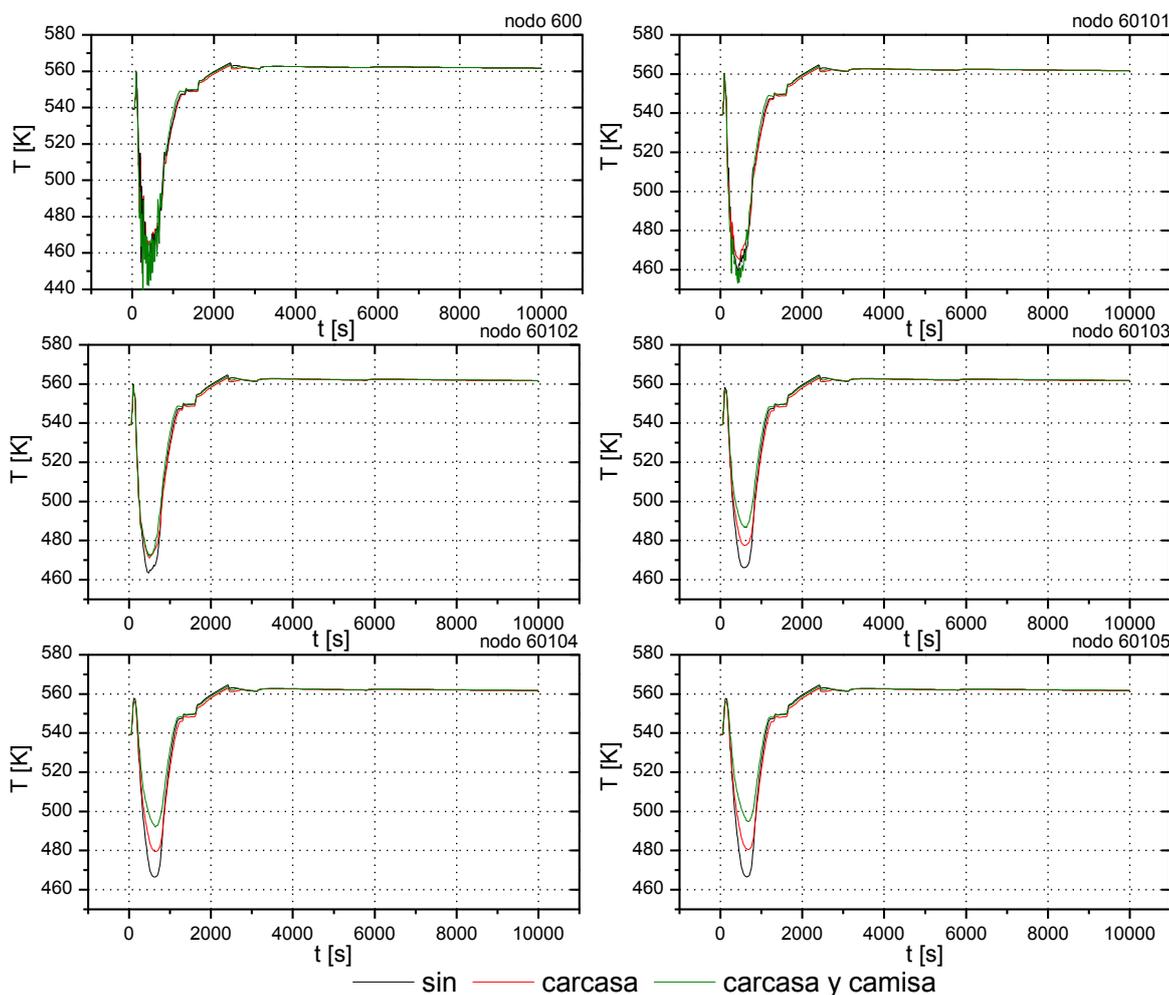


Figura 6.11. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Temperaturas del *downcomer*.

De izquierda a derecha y de arriba a bajo se muestran las temperaturas de los nodos del *downcomer* en el mismo orden en que el agua fluye a través del generador de vapor.

Se observa que a medida que el agua avanza en contacto con las estructuras, que antes no se consideraban, su temperatura aumenta, en mayor medida si se consideran las dos a la vez. Esto es debido a que las estructuras de calor transfieren energía, acumulada en el caso de la estructura de la carcasa y transferida de *boiler* a *downcomer* en el caso de la estructura camisa. Si no se consideran estas estructuras, el calor transportado por el refrigerante se transfiere directamente al *boiler*. Esta transferencia se puede observar en el gráfico de la página siguiente (figura 6.12).

Si solo se considera la estructura exterior, la potencia transferida por la carcasa es mayor que con las dos, pero cada nodo recibe más energía si se consideran ambas. En consecuencia la temperatura de los nodos es superior con las dos estructuras.



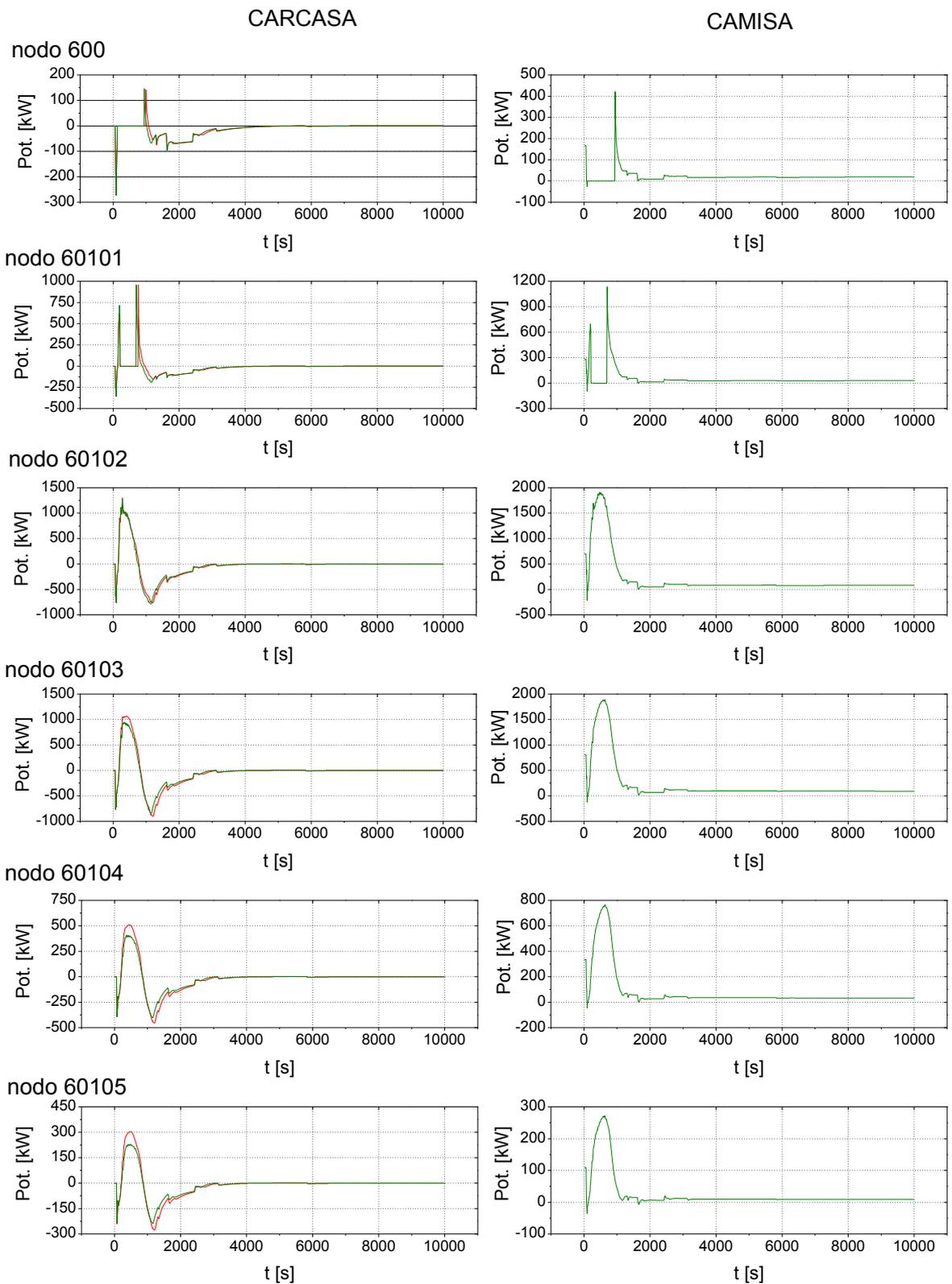


Figura 6.12. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Transferencia de calor cedida por las estructuras de calor carcasa y camisa.



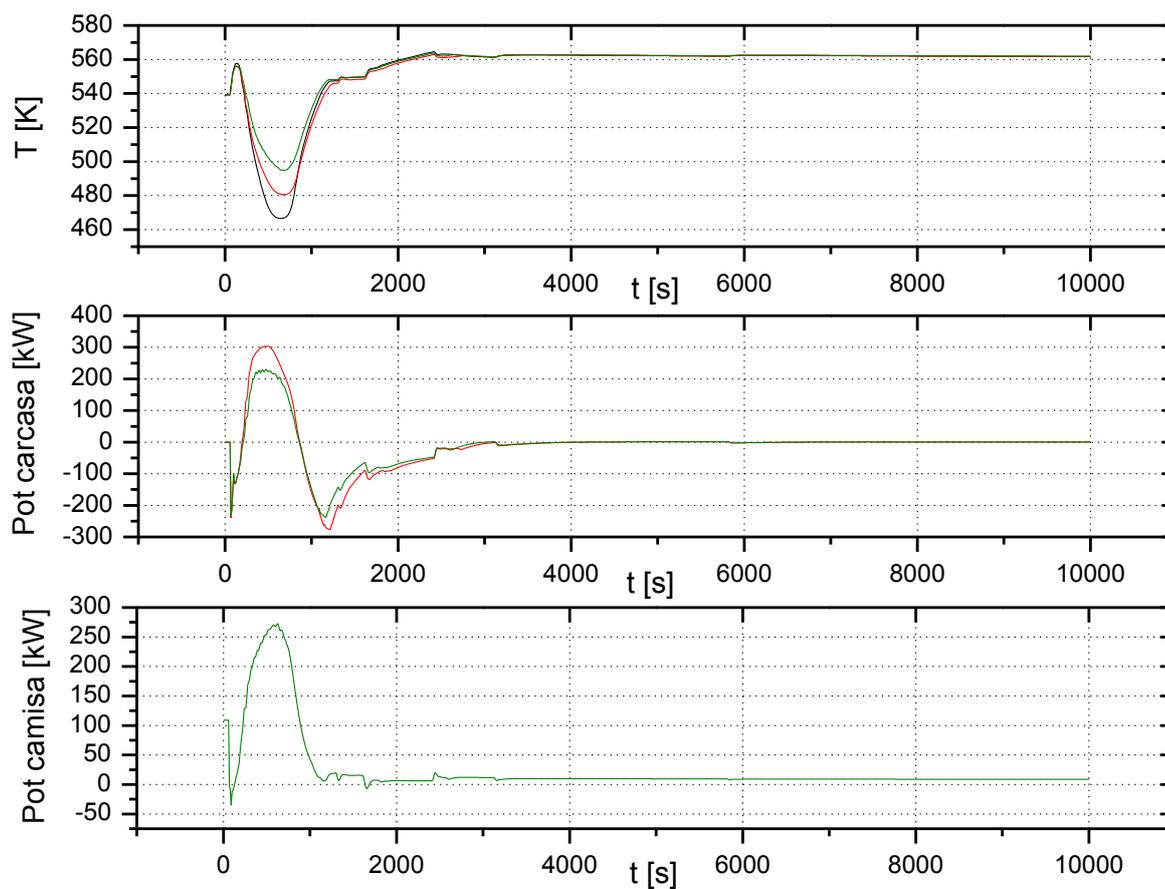


Figura 6.13. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Análisis del último nodo del *downcomer*. Nodo 60105.

El generador de vapor es un sistema cerrado, es decir, la energía transferida desde el primario se utiliza para producir vapor y no se consideran pérdidas hacia el exterior. Esta hipótesis es aceptable debido a que el generador de vapor está correctamente aislado en la realidad. Por tanto, al incorporar las estructuras de calor tan solo se consideran nuevas rutas de transferencia de calor, no nuevas fuentes.

En estado estacionario la temperatura de la pared de la carcasa está en equilibrio con el agua del secundario y por lo tanto la transferencia es nula. La parada de la turbina provoca un aumento de la presión y de la temperatura en el secundario, siendo ahora la temperatura del líquido superior a la temperatura de la carcasa y por tanto la transferencia de calor de la estructura es negativa, es decir, la pared se calienta. La entrada de AAA provoca un descenso de la temperatura del agua del secundario y es ahora la pared de la carcasa la que cede calor al agua.

El aumento de la temperatura en el agua del *downcomer* afecta a las variables generales del sistema, como la presión y las temperaturas en el primario (figuras 6.14 y 6.15)



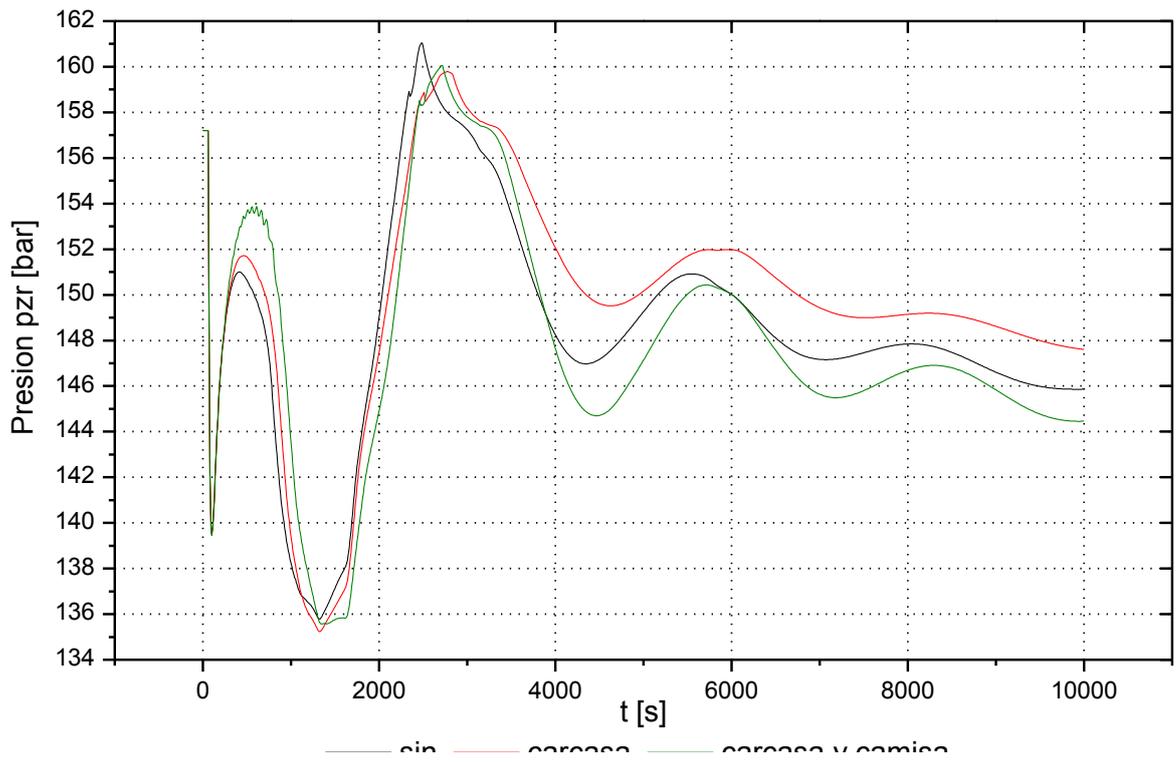


Figura 6.14. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Presión en el presionador.

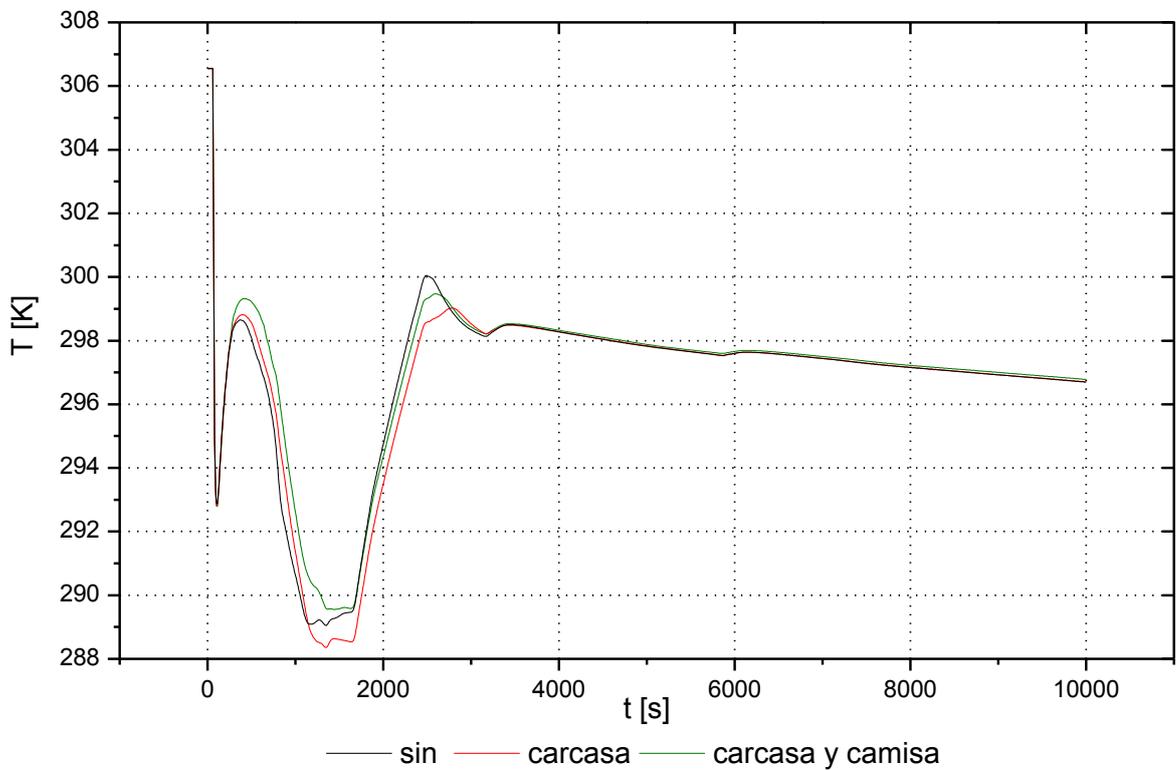


Figura 6.15. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Temperatura media del lazo 1.



Se recuerda que en el caso de pérdida de suministro eléctrico exterior, la presión en el primario se regula mediante la extracción de calor a través de los generadores de vapor.

Se observa en el gráfico de la página anterior que el primer pico en la presión del primario es más de tres bares superior considerando las dos estructuras simultáneamente. Esto es debido a que la transferencia de calor primario-secundario es inferior si se consideran ambas. El calor transportado por el refrigerante se transfiere al secundario por convección y conducción. Se ha observado que la temperatura del agua que fluye por el *downcomer* es superior y por tanto el calor transferido disminuye.

En los siguientes gráficos se muestra la transferencia de calor entre el circuito primario y el secundario. Es difícil de observar a simple vista que la transferencia de calor en el caso de considerar las dos estructuras es inferior debido a la oscilación durante los primeros segundos del transitorio, por eso se calcula y se grafica la integral de la potencia transferida entre el primario y el secundario (figuras 6.16 - 6.19).

La diferencia en calor transferido entre las distintas configuraciones alcanza un valor de 2 GJ a los 780 s del transitorio (figura 6.19). Esta diferencia provoca un aumento en la presión del primario, con respecto al transitorio base, de 3,87 bares en el primer pico (entre los 300 y los 800 s) si se incorporan ambas estructuras de calor (figura 6.15).

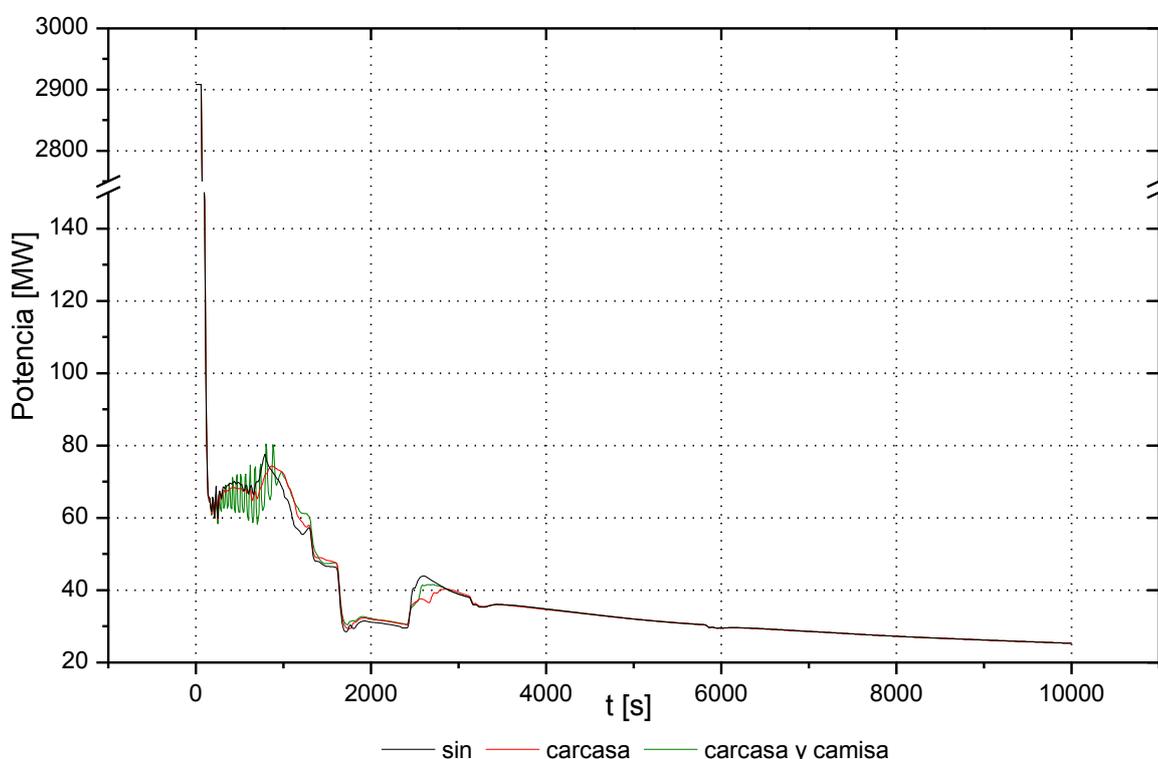


Figura 6.16. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Transferencia de calor primario-secundario.



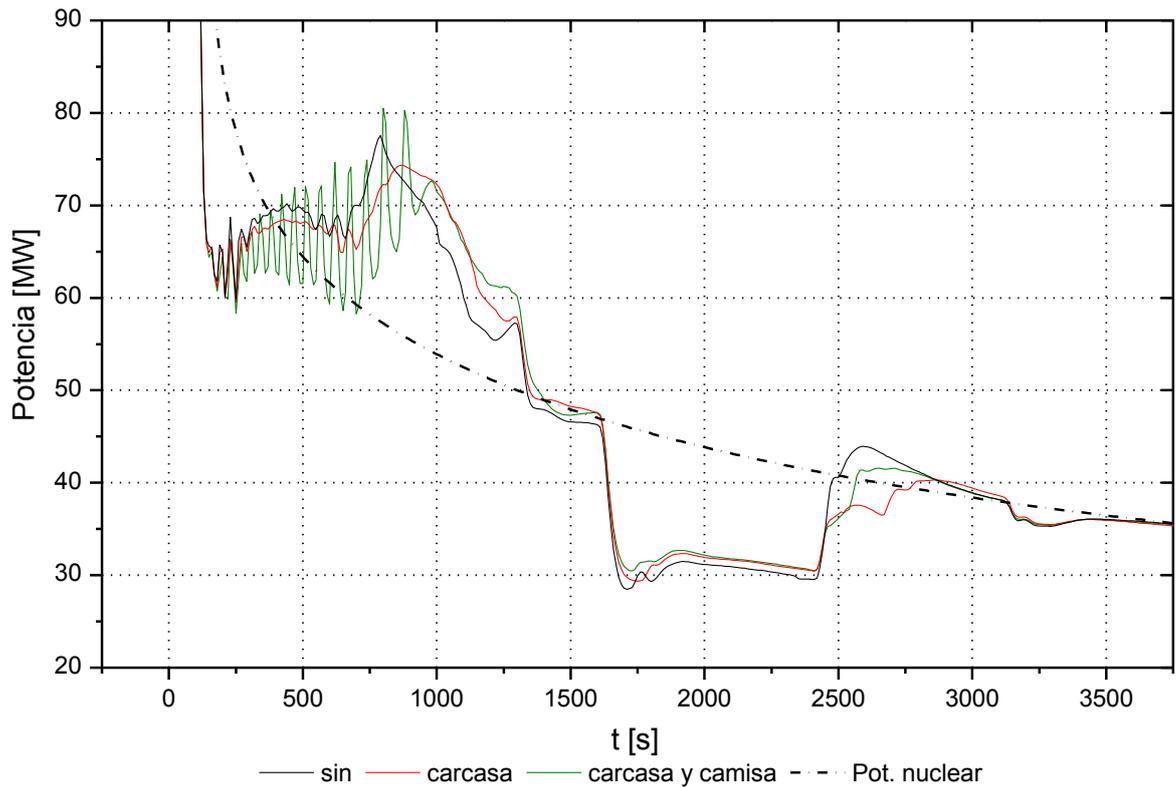


Figura 6.17. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Transferencia de calor.

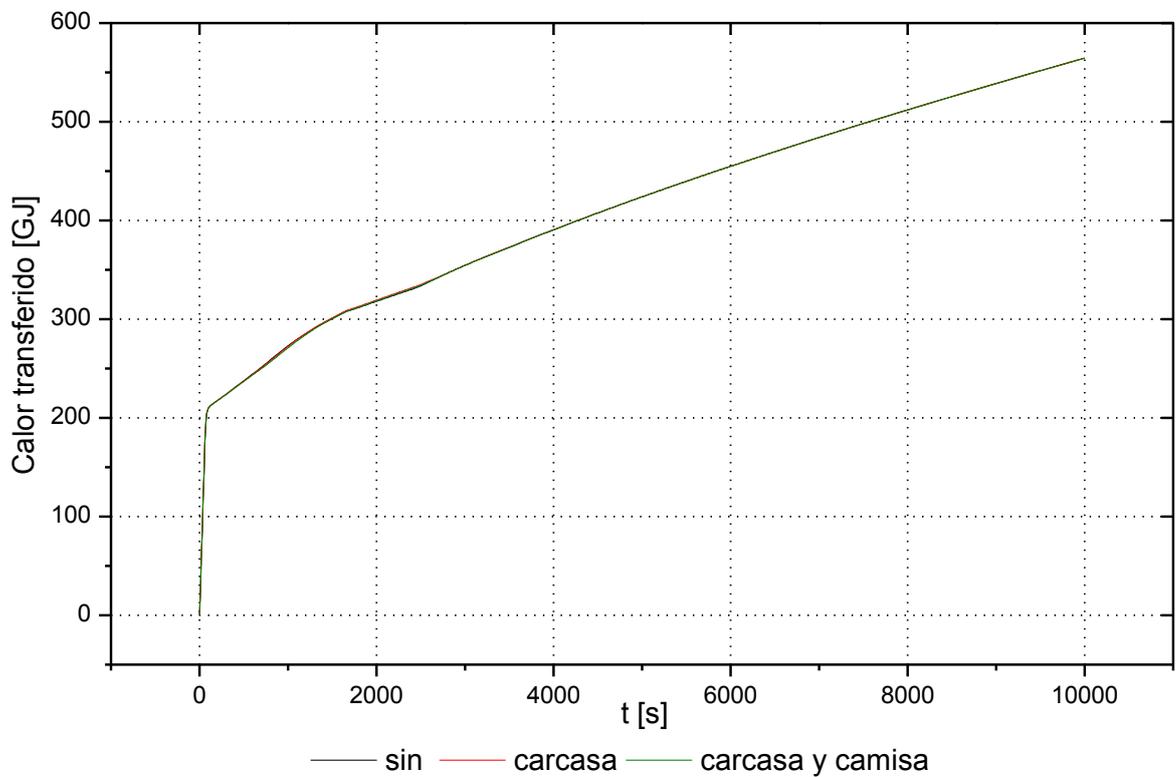


Fig. 6.18. Pérdida suministro eléctrico exterior CNA: Calor transferido primario/secundario.



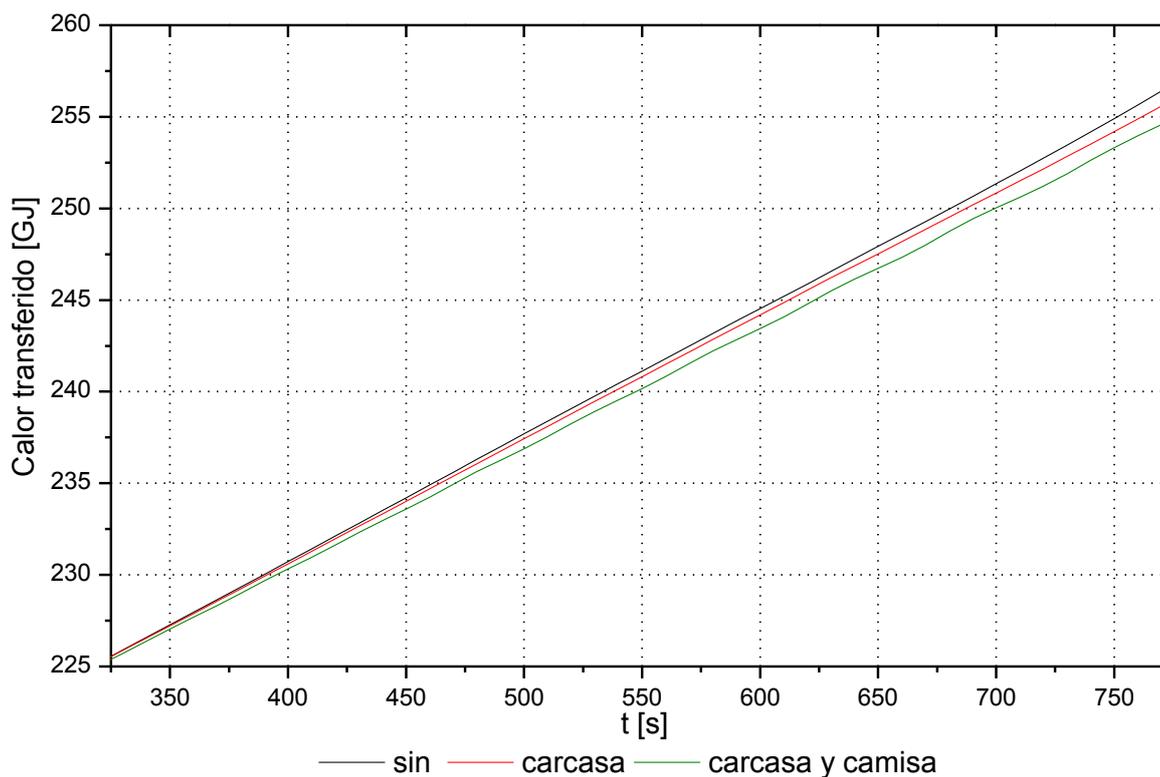


Figura 6.19. Pérdida de suministro eléctrico exterior CNA: Calor transferido entre primario y secundario.

### 6.2.3. Conclusiones de la pérdida de suministro eléctrico exterior

A la vista de los resultados se hace evidente que las discrepancias se producen cuando el generador de vapor disminuye su cantidad de agua, por eso en el siguiente punto se analiza la influencia de las estructuras con un transitorio más perjudicial para los generadores de vapor, donde el nivel disminuya aun más y se queden secos durante más tiempo, como por ejemplo en el transitorio de pérdida total de agua de alimentación.

### 6.2.4. Documentación

- **Referencias**

Nota de cálculo del modelo de la C.N. Ascó para el programa RELAP5/MOD3. Marzo 2003.

NUREG/CR-5535-V2 (INEL-95/0174) "RELAP5/MOD3 code manual". Juny 1995.

Diagramas lógicos y de nodalitzación de la C.N. Ascó. Marzo 2003.



- **Archivos**

<b>NOMBRE</b>	<b>CONTENIDO</b>
BOL-ANA1008.inp	Modelo de la planta de Ascó (estacionario).
HScar_BOL-ANA1008.inp	Modelo de la CNA con la estructura carcasa.
HS_BOL-ANA1008.inp	Modelo de la CNA con las estructuras carcasa y camisa.
reduc_ANA.rst	
HScar_reduc.rst	Ficheros de resultados del estacionario.
HS_reduc.rst	
ANA_TR.inp	
HScar-ANA_TR.inp	Ficheros de entrada del transitorio.
HS-ANA_TR.inp	
HS-ANA_TR.out	
HScar-ANA_TR.out	Ficheros de salida del transitorio.
HS-ANA_TR.out	
HS-ANA_TR.rst	
HScar-ANA_TR.rst	Ficheros de resultados del transitorio.
HS-ANA_TR.rst	
TR.opj	Gráficos de los strips.

Tabla 6.20: Archivos generados para la simulación del transitorio de pérdida de suministro eléctrico exterior.



## 6.3. Pérdida total de agua de alimentación con maniobra de *feed&bleed* y recuperación del foco frío.

### 6.3.1. Descripción del transitorio

Para simular este transitorio se ha modificado la nodalización del tanque del presionador, modelándolo ahora con nodos definidos por el tiempo, para simplificar los cálculos y los errores durante la simulación tal y como hizo Ríos Rodríguez, M. en su PFC [7].

La secuencia empieza con la planta en estado estacionario después de 12.000 segundos de transitorio nulo. En estas condiciones se pierde el agua de alimentación principal debido por ejemplo a un fallo múltiple en las bombas. Esto provoca la parada automática de la turbina seguido de la parada del reactor (figuras 6.21 y 6.22).

La conmutación del by-pass de salida del vapor al condensador se hace imposible por su indisponibilidad así pues se abren las válvulas de alivio de los generadores de vapor para disminuir la presión en el secundario enviando el vapor a la atmósfera (figura 6.24 y 6.25).

En estas circunstancias debería entrar en funcionamiento el sistema de agua de alimentación auxiliar pero tampoco se encuentra disponible debido por ejemplo al fallo de apertura de las válvulas, así pues, se pierde la capacidad de enfriamiento del refrigerante a través del secundario y se detienen manualmente las bombas del primario a los 350 segundos (figura 6.23).

La evolución continúa con una disminución constante en el nivel de los generadores de vapor. Debido a su gran tamaño tardan 1.800 segundos en llegar al 6% del nivel de rango ancho (figura 6.26) y durante 4.200 segundos el operador intentará recuperar el AAA antes de proceder a la maniobra de *feed&bleed*.

Se postula la indisponibilidad de un tren de HPI y una válvula PORV del presionador que comunica con su tanque de alivio.

Así pues, a los 4.200 segundos empieza la maniobra del *feed&bleed*, traducido como alimentar y sangrar (figuras 6.28 y 6.29), tiempo durante el cual no existe circulación natural en el primario a través de los generadores de vapor.

La inyección de seguridad de alta presión aporta refrigerante al primario con el fin de disminuir las temperaturas de las ramas y las vainas. Se abre totalmente la válvula de alivio del presionador favoreciendo la circulación del refrigerante a través del núcleo y la consiguiente extracción de calor. La masa de refrigerante que se pierde a través de la válvula PORV se acumula en el tanque de alivio del presionador.



A los 4.500 segundos se restablece el caudal de AAA y en consecuencia se recupera el foco frío. Así pues a partir de este instante se seguirán las instrucciones de operación en emergencia (IOE) [8].

Cuando el nivel de rango estrecho de alguno de los generadores de vapor es superior al 11% se cierra la PORV (7.720 segundos) aumentando así ligeramente la presión del primario y cuando el margen de subenfriamiento es superior a 56 °C se anula la HPI, a los 8.400 segundos (figura 6.27).

Llegado a este punto solo queda regular el AAA para estabilizar la planta de forma gradual en parada caliente (figuras 6.30 - 6.34).

Este es uno de los transitorios más perjudiciales para los generadores de vapor. En estado estacionario las estructuras de calor se encuentran en equilibrio térmico con el agua y cuando aumenta la temperatura de ésta, las estructuras se calientan. Con la entrada de agua de alimentación auxiliar la carcasa y la camisa transfieren calor al agua que fluye a través del *downcomer*. Se analizará el impacto de este aumento de temperatura sobre la transferencia de calor entre primario y secundario y la repercusión en las variables globales del sistema y en el tiempo necesario para estabilizar la planta.

Se observan ahora algunas de las variables más significativas.

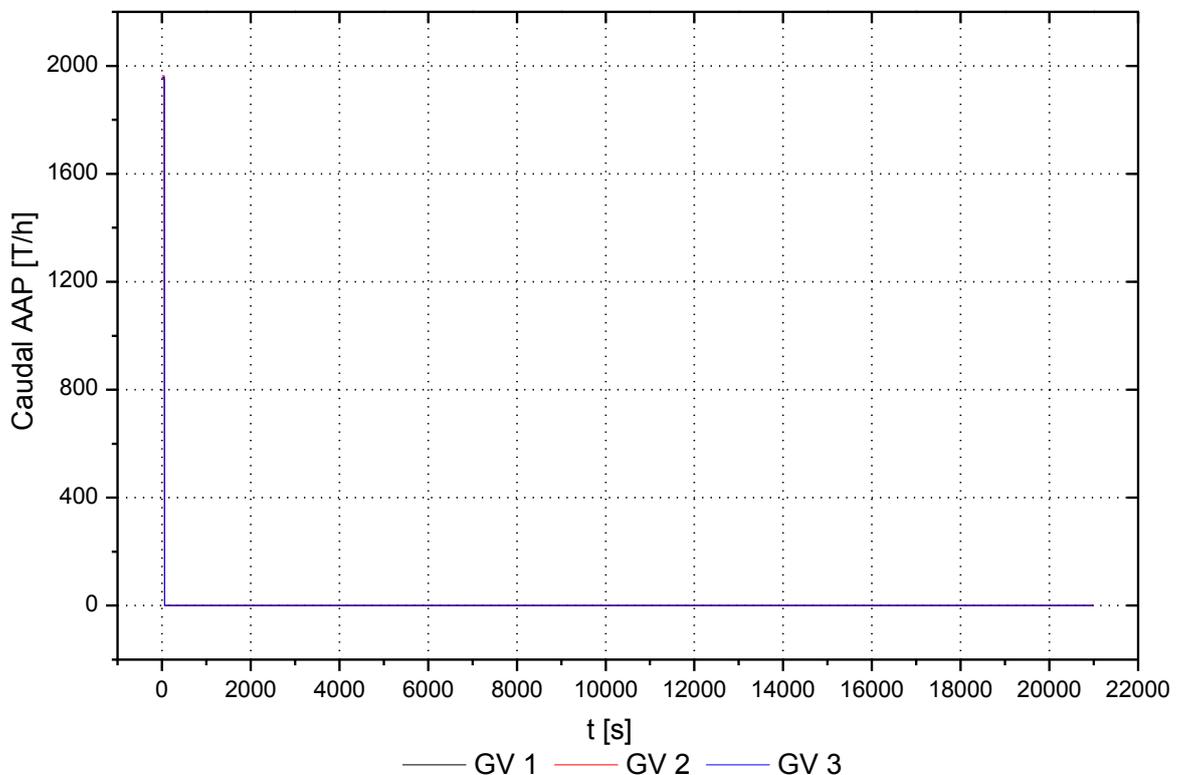


Figura 6.21. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Caudal de AAP.



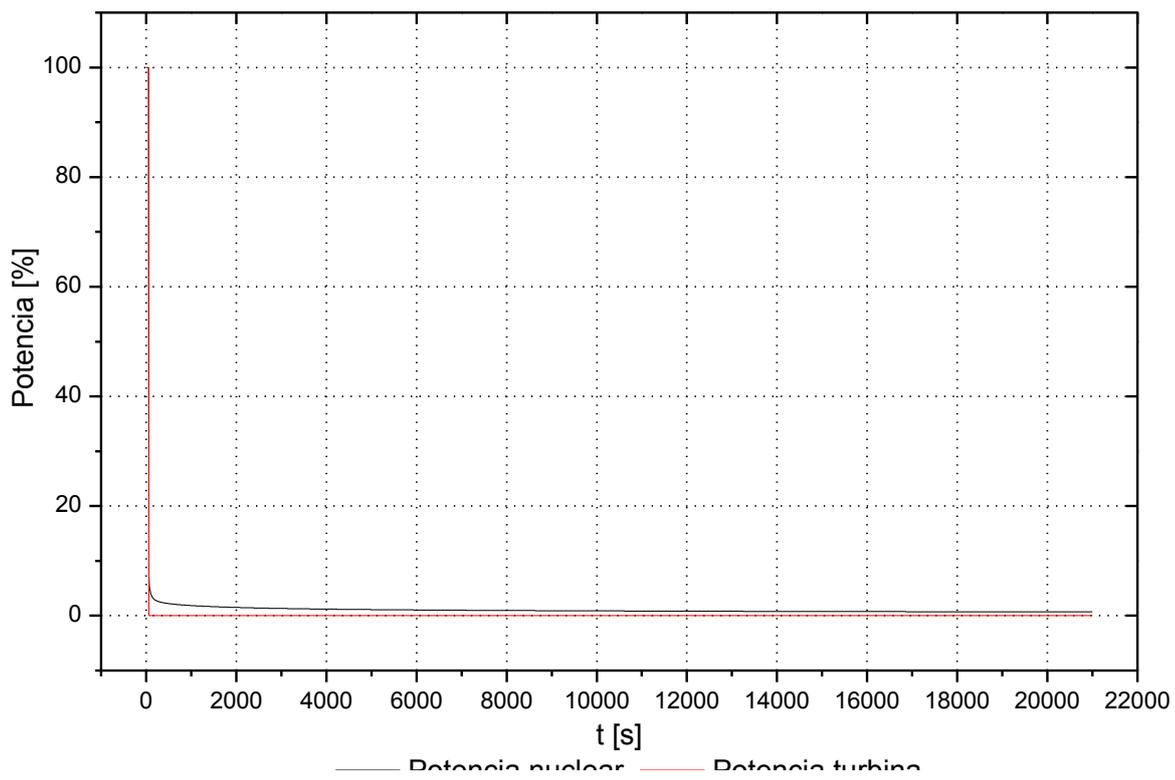


Figura 6.22. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Potencia nuclear y de la turbina.

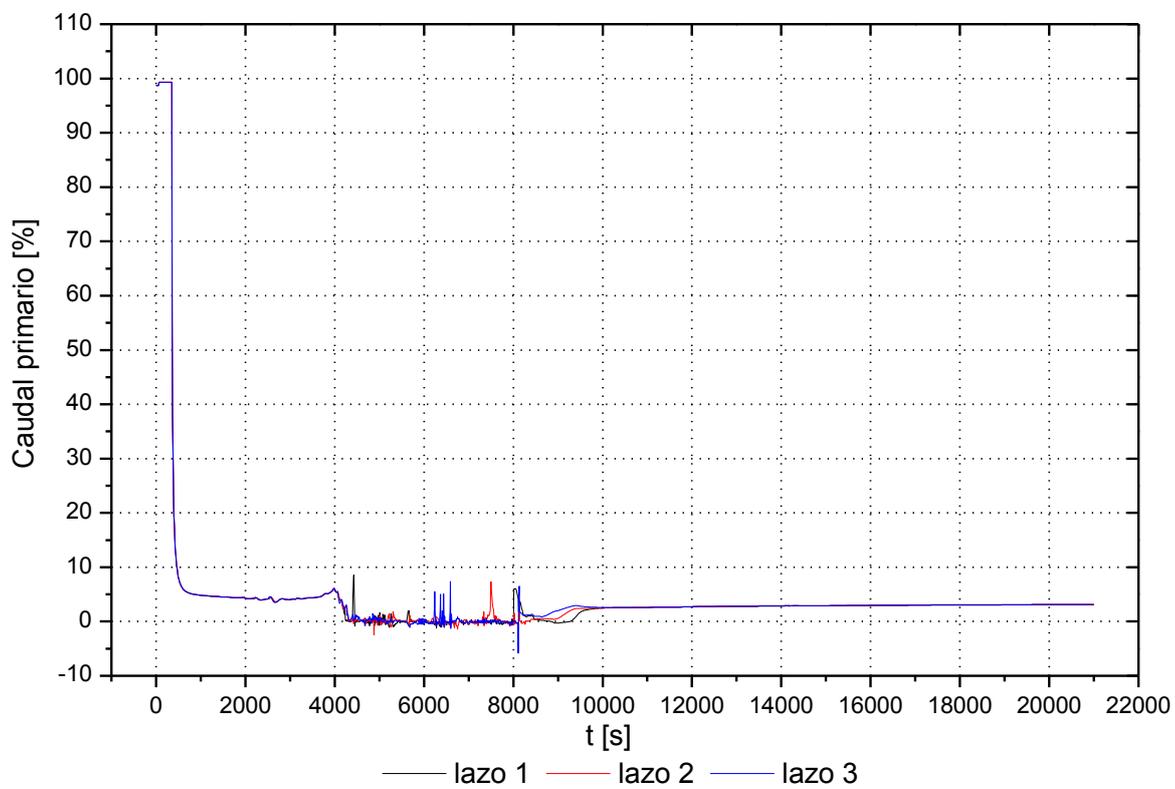


Figura 6.23. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Caudal primario.



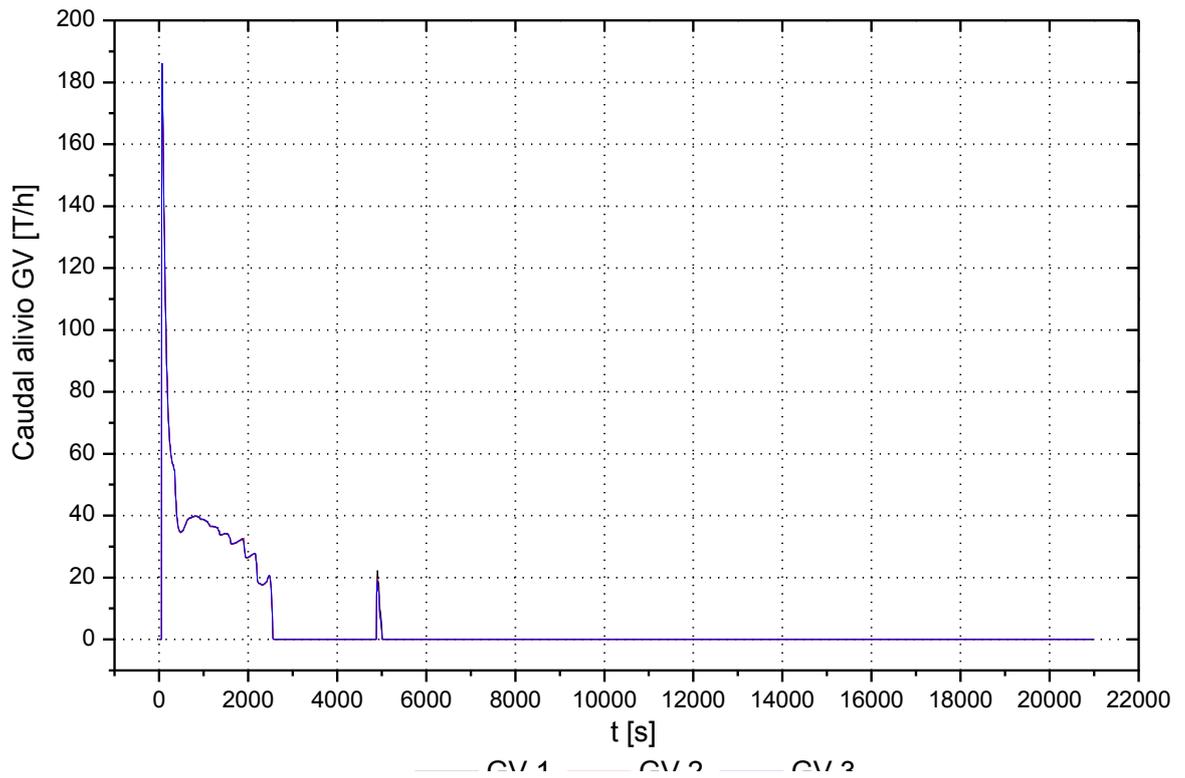


Figura 6.24. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Caudal de alivio de los GV.

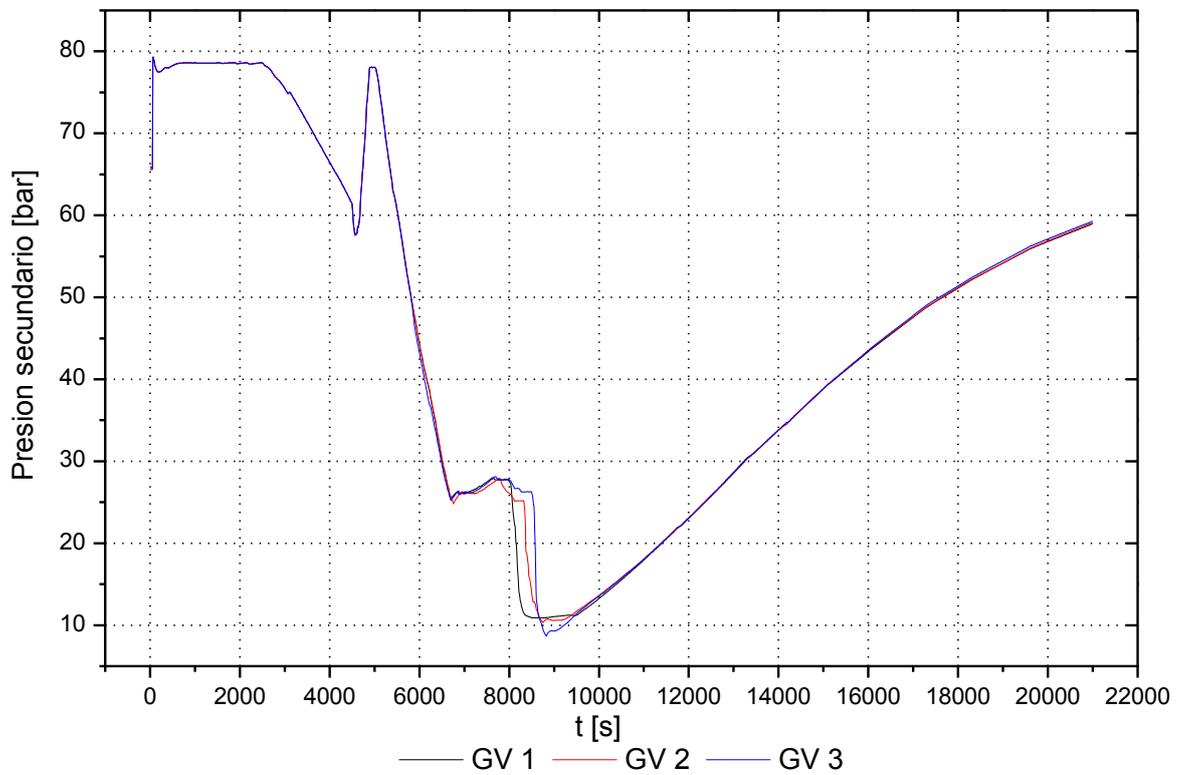


Figura 6.25. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Presión en el secundario.



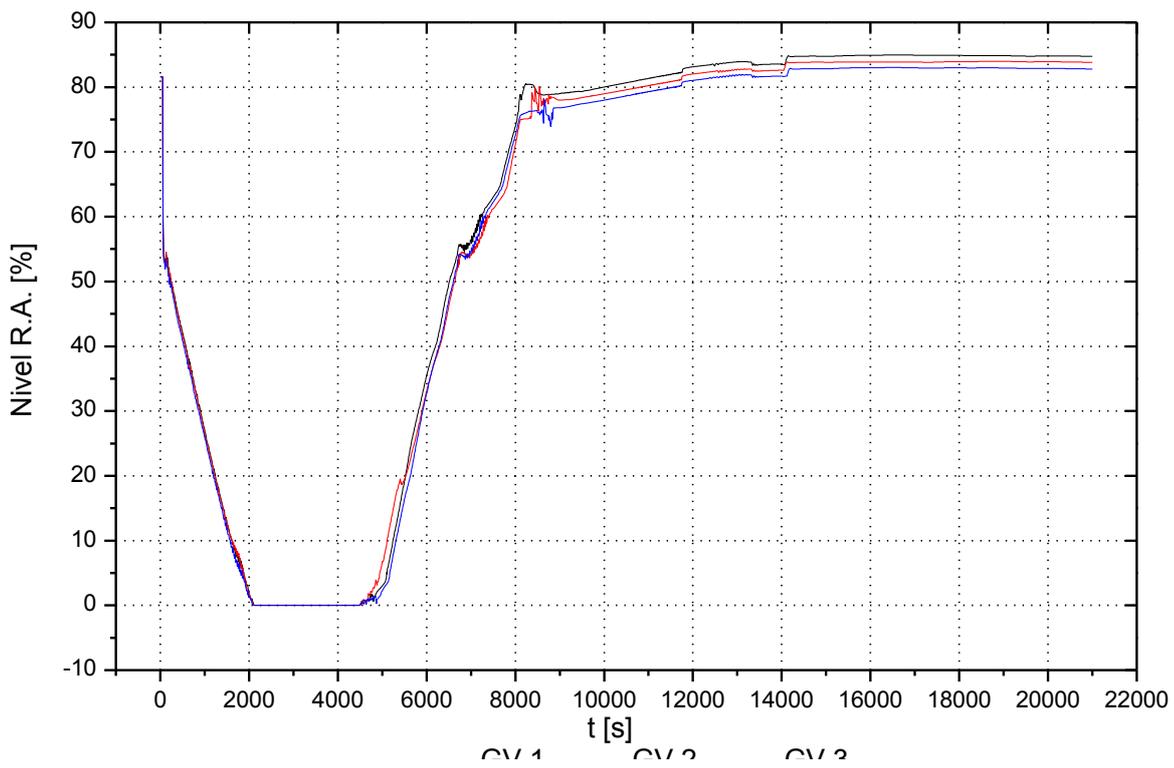


Figura 6.26. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Nivel R.A. en los GV.

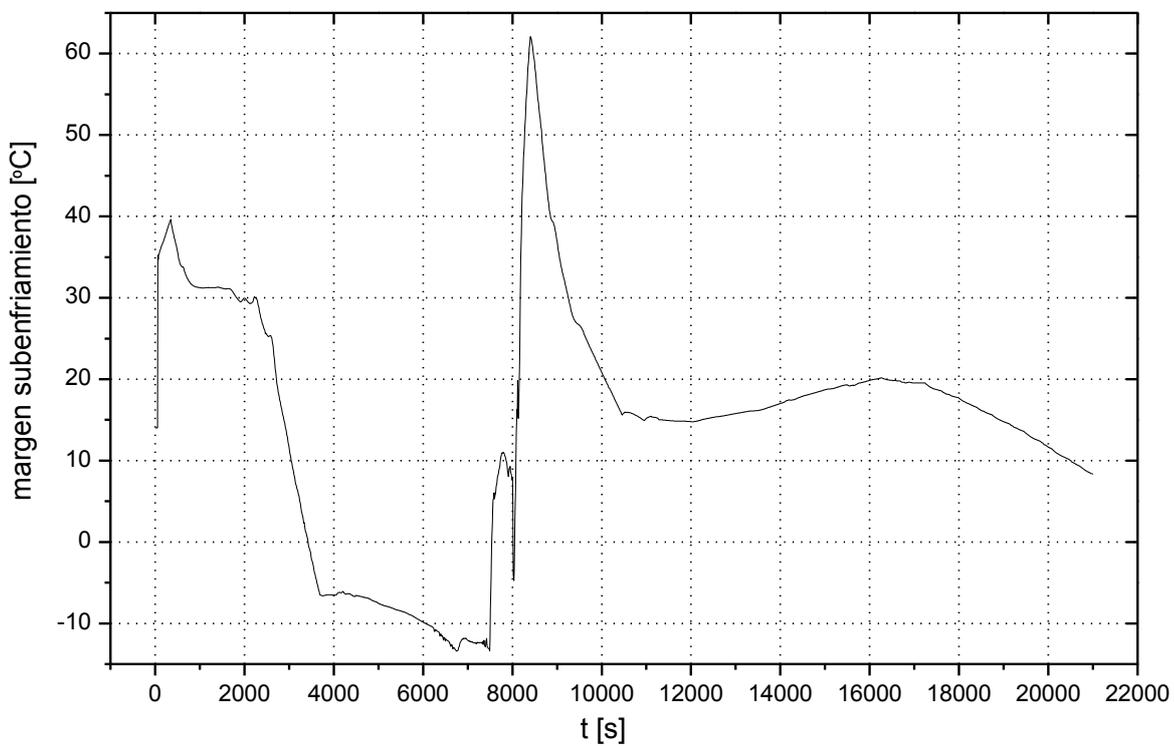


Figura 6.27. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Margen de subenfriamiento.



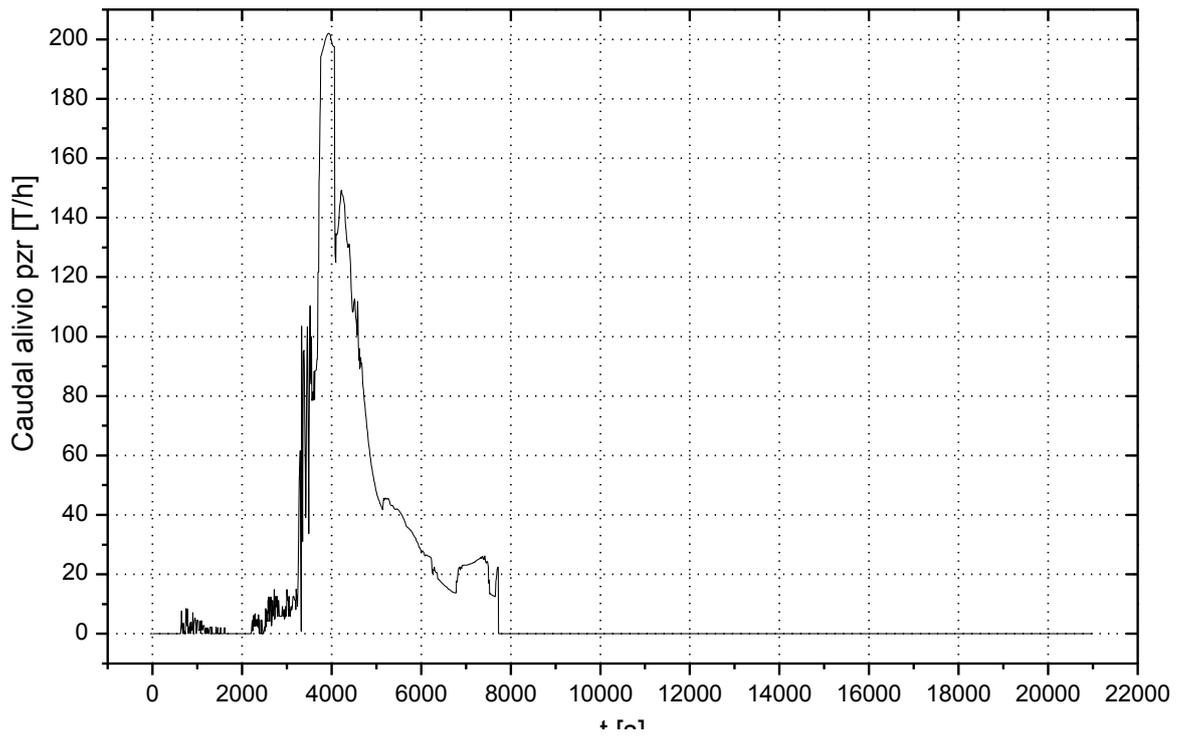


Figura 6.28. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Caudal de alivio de la PORV.

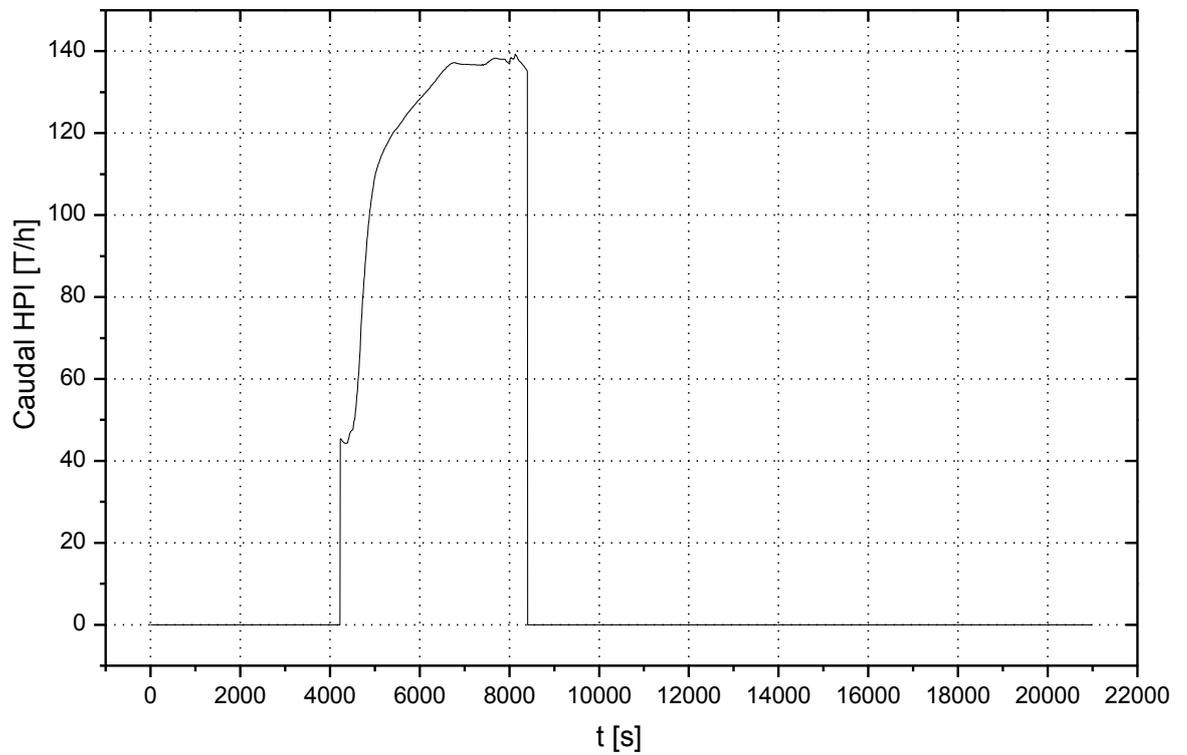


Figura 6.29. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Caudal de HPI.



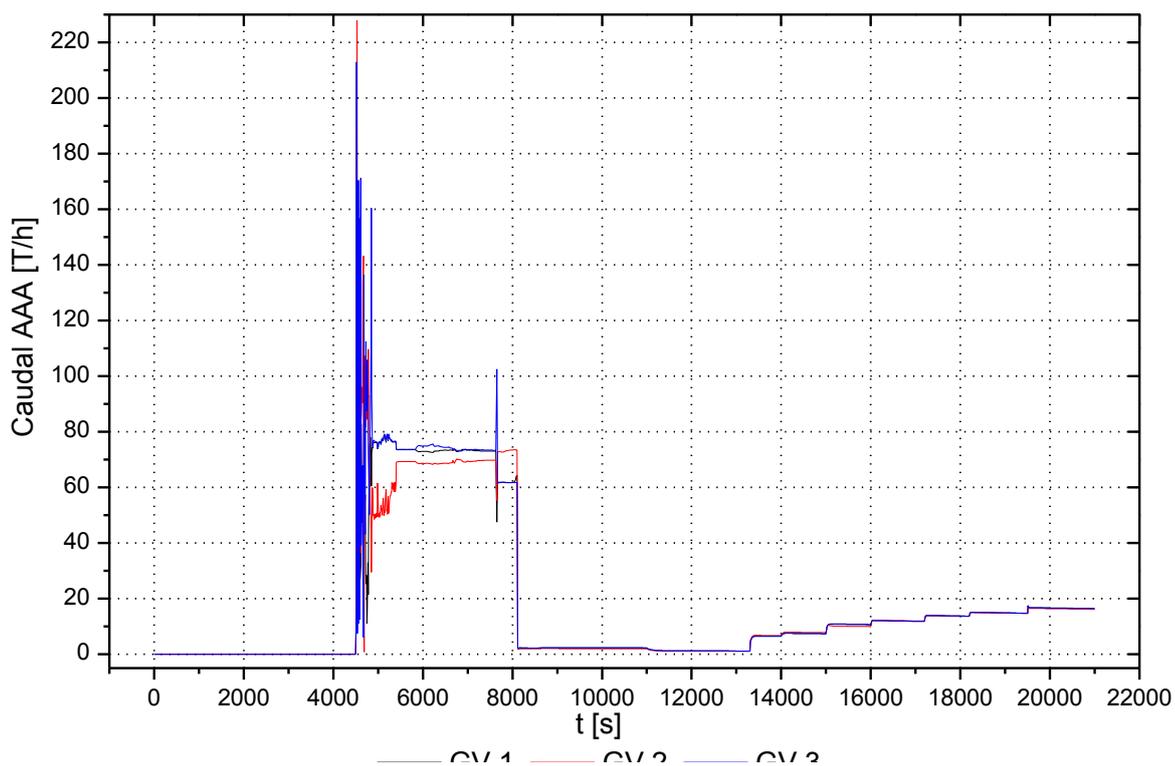


Figura 6.30. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Caudal de agua de AAA.

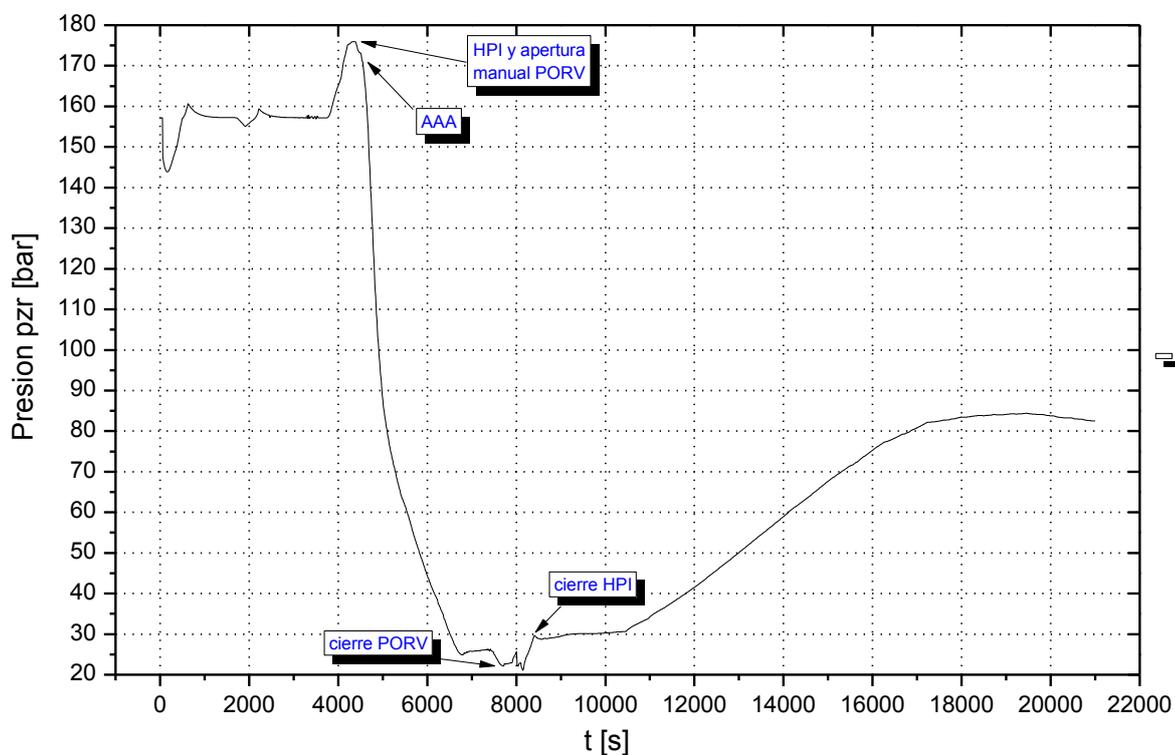


Figura 6.31. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Presión en el presionador.



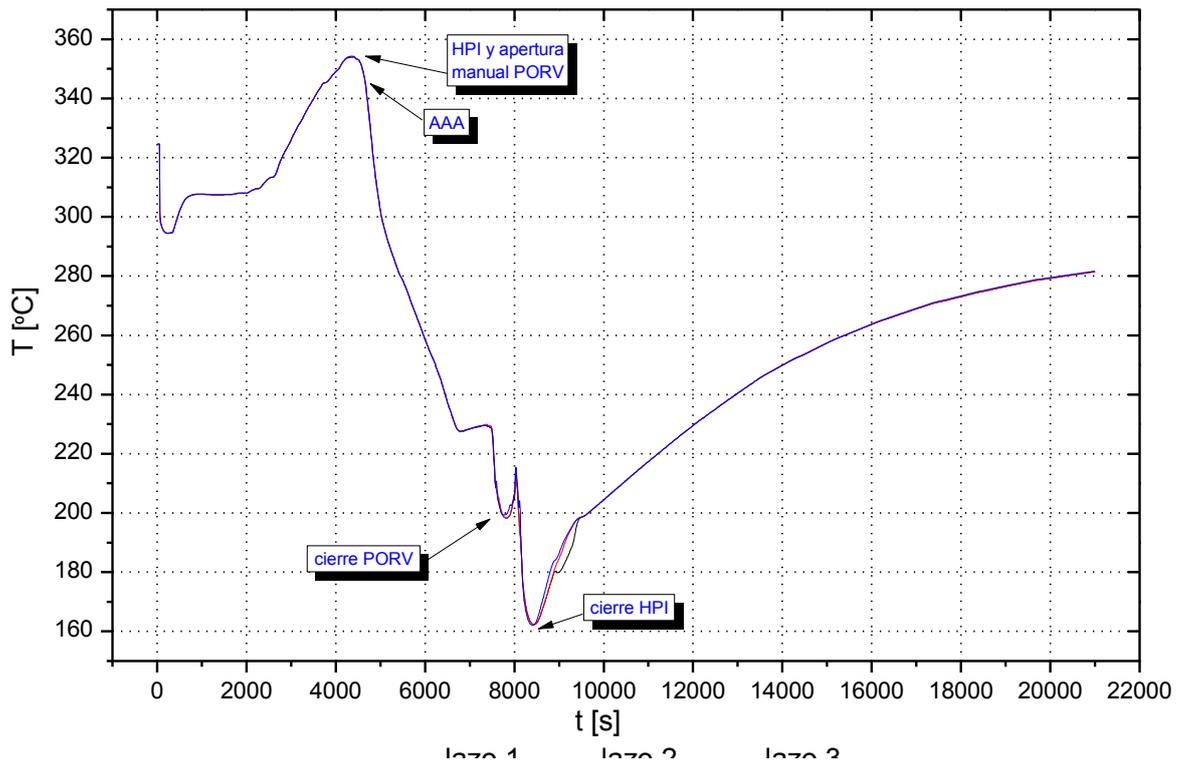


Figura 6.32. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Temperaturas de ramas calientes.

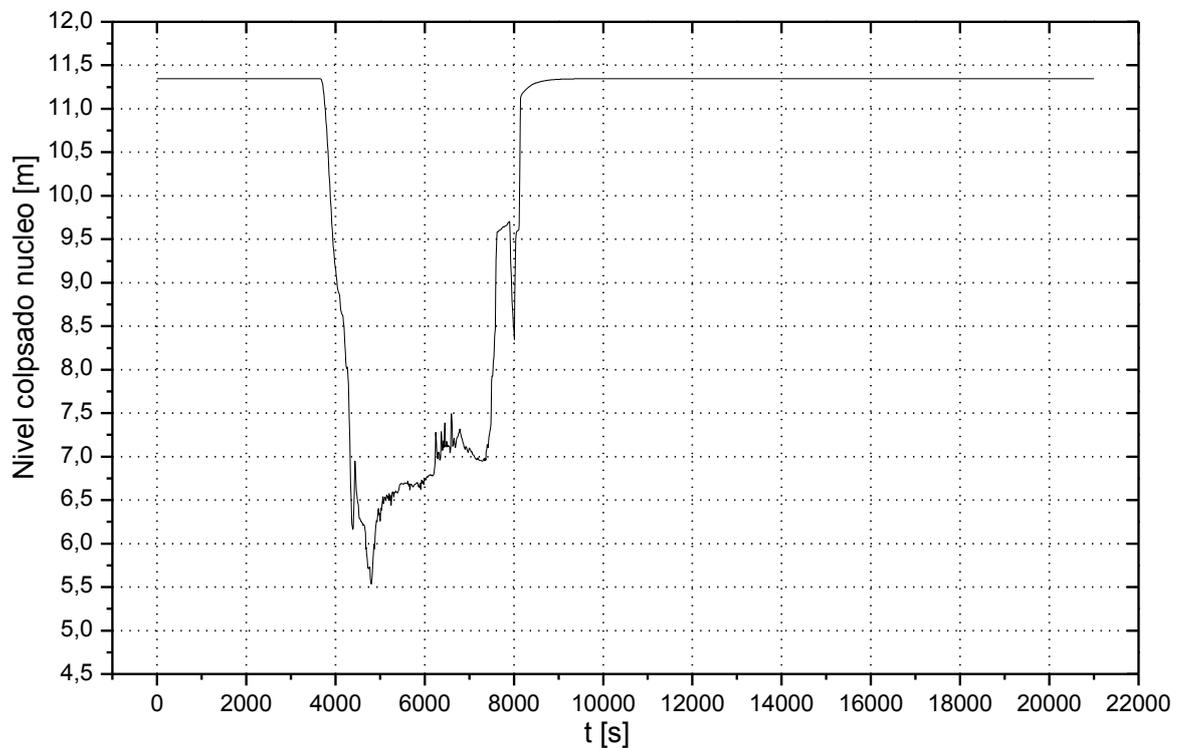


Figura 6.33. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Nivel colapsado del núcleo.



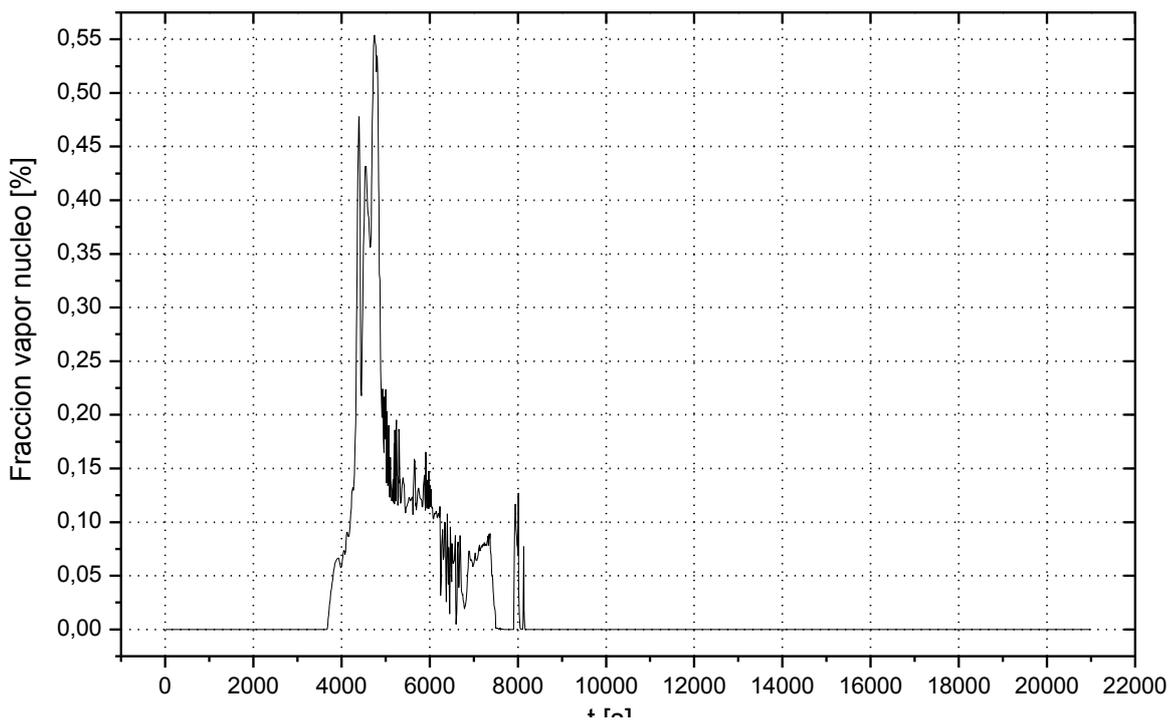


Figura 6.34. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Fracción de vapor en el nodo 140.

En la tabla 6.35 se muestra la cronología del transitorio:

TIEMPO ( SEGUNDOS )	EVENTO
50	Pérdida de AA
350	Parada de las BRR's
1812,6	Nivel RA de 2/3 GV al 6%
4212,6	Apertura manual de HPI y de la PORV
4500	Recuperación del foco frío (AAA)
4500	Apertura válvulas interconexión y cierre TBAAA
7720	Cierre manual de la PORV
8400	Cierre de HPI
21000	Fin del transitorio

Tabla 6.35. Cronología del transitorio de pérdida total de agua de alimentación.



### 6.3.2. Comparativa de resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos considerando la estructura de calor de la carcasa (rojo), la camisa y la carcasa simultáneamente (verde) y se realiza la comparativa entre los resultados obtenidos.

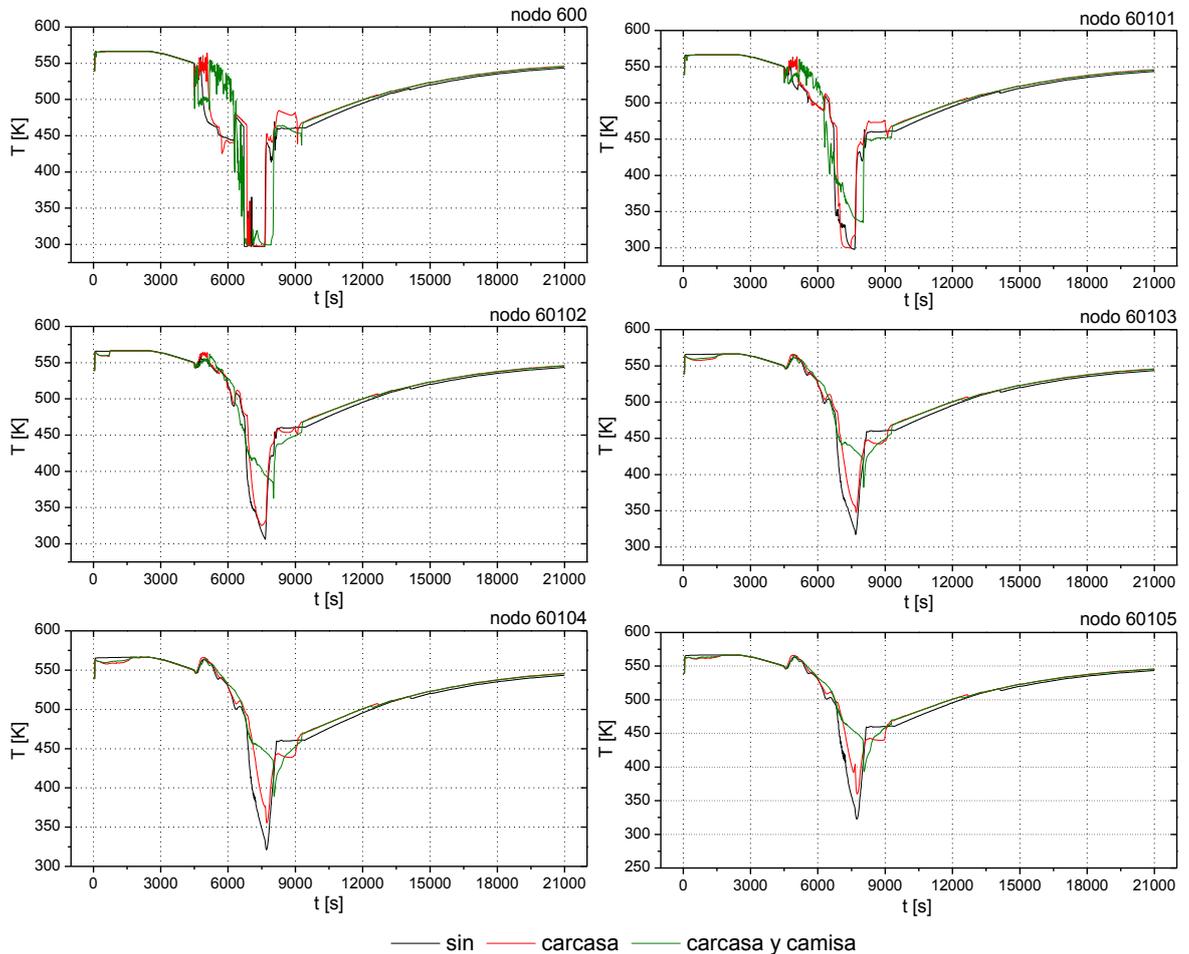


Figura 6.36. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Temperaturas del *downcomer*.

La parada de la turbina provoca el aumento de la presión y la temperatura en el secundario. Si se considera la estructura de calor de la carcasa se observa un descenso inicial de la temperatura de los nodos del *downcomer* debido a la acumulación de calor en el metal. Durante la maniobra del *feed&bleed* son las estructuras de calor las que transfieren energía al agua y la temperatura de estos nodos aumenta con respecto al caso base hasta 80 °C.

Este efecto se refleja en la transferencia de calor entre primario y secundario siendo 20 GJ inferior si se consideran ambas estructuras. Esto provoca un aumento de la temperatura y la presión en el circuito primario y un retraso en la estabilización del nivel colapsado del núcleo de 3.000 segundos con respecto al caso base (figuras 6.38 - 43)



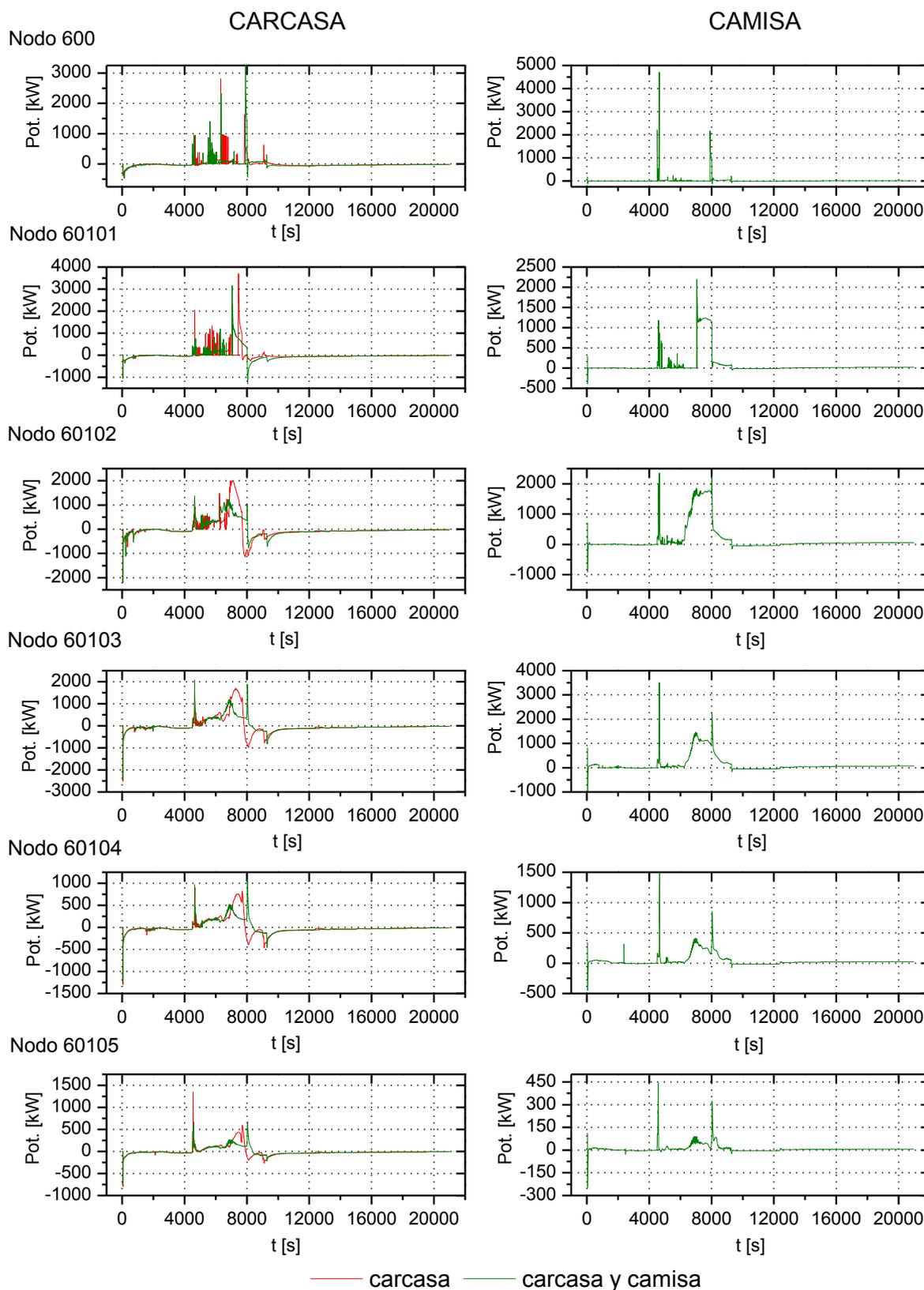


Figura 6.37. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Transferencia de calor cedida por las estructuras de calor carcasa y camisa.



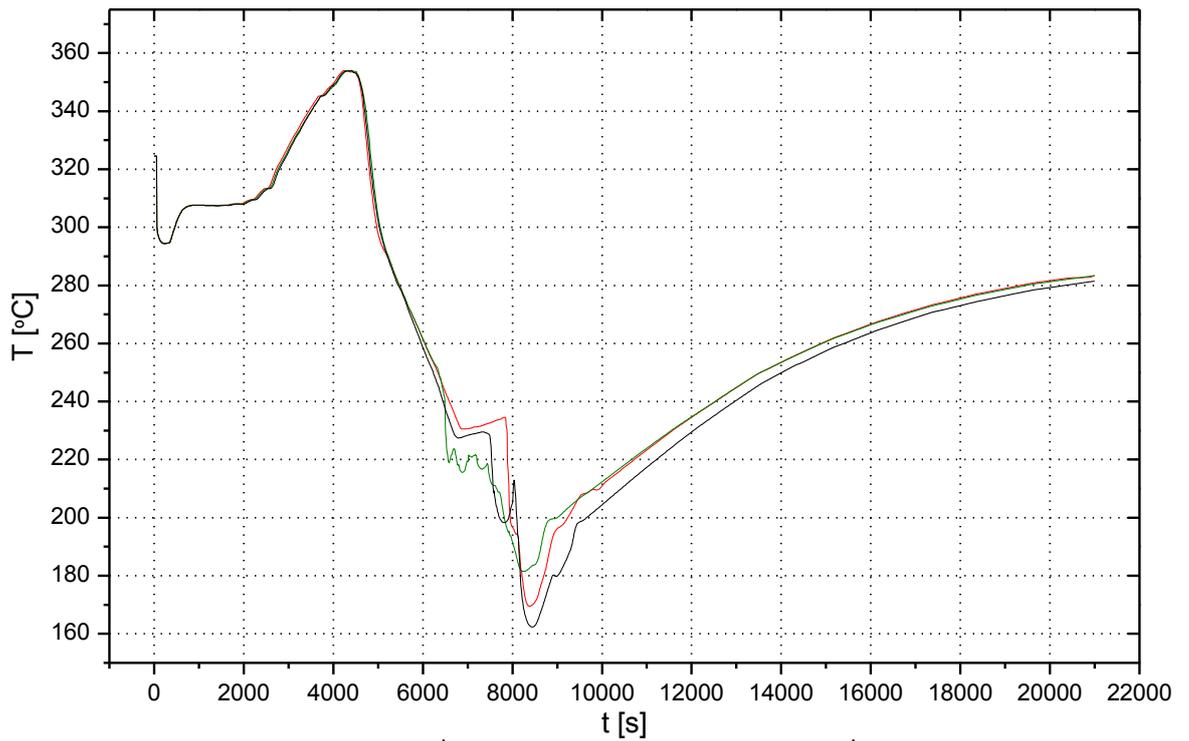


Figura 6.38. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Temperatura caliente lazo 1.

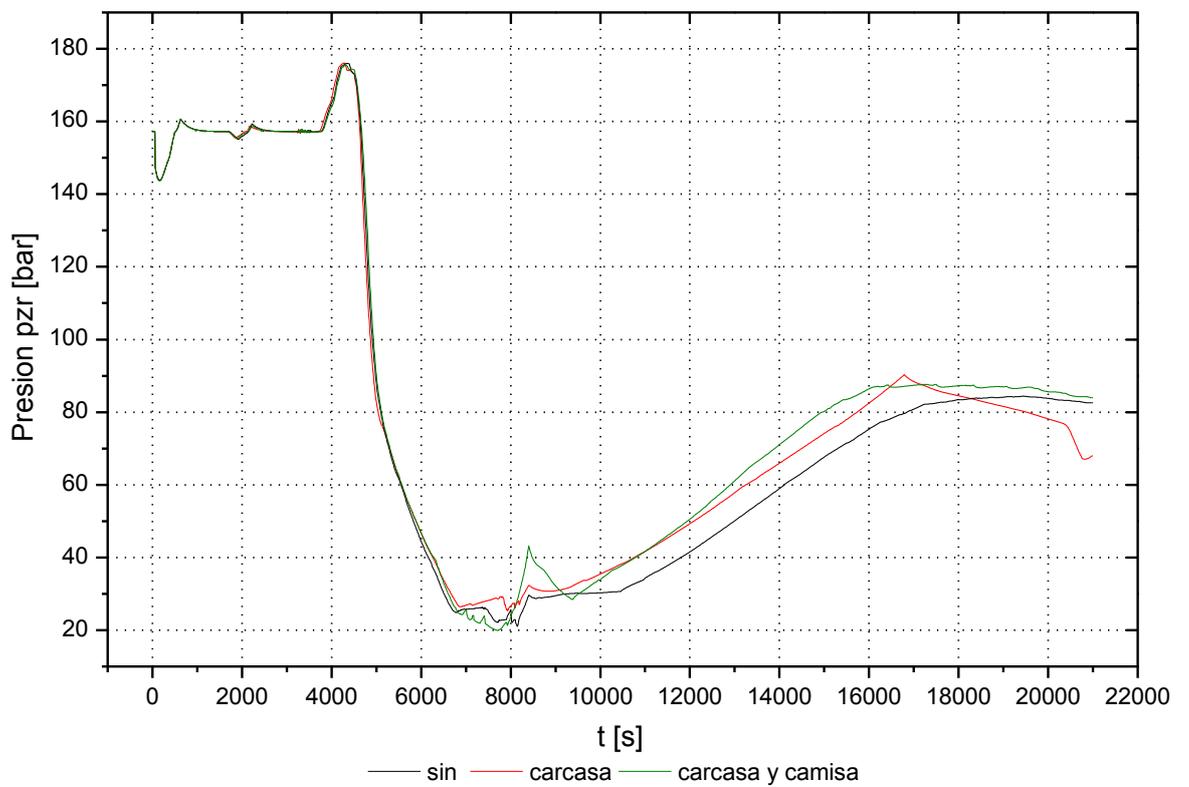


Figura 6.39. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Presión en el presionador.



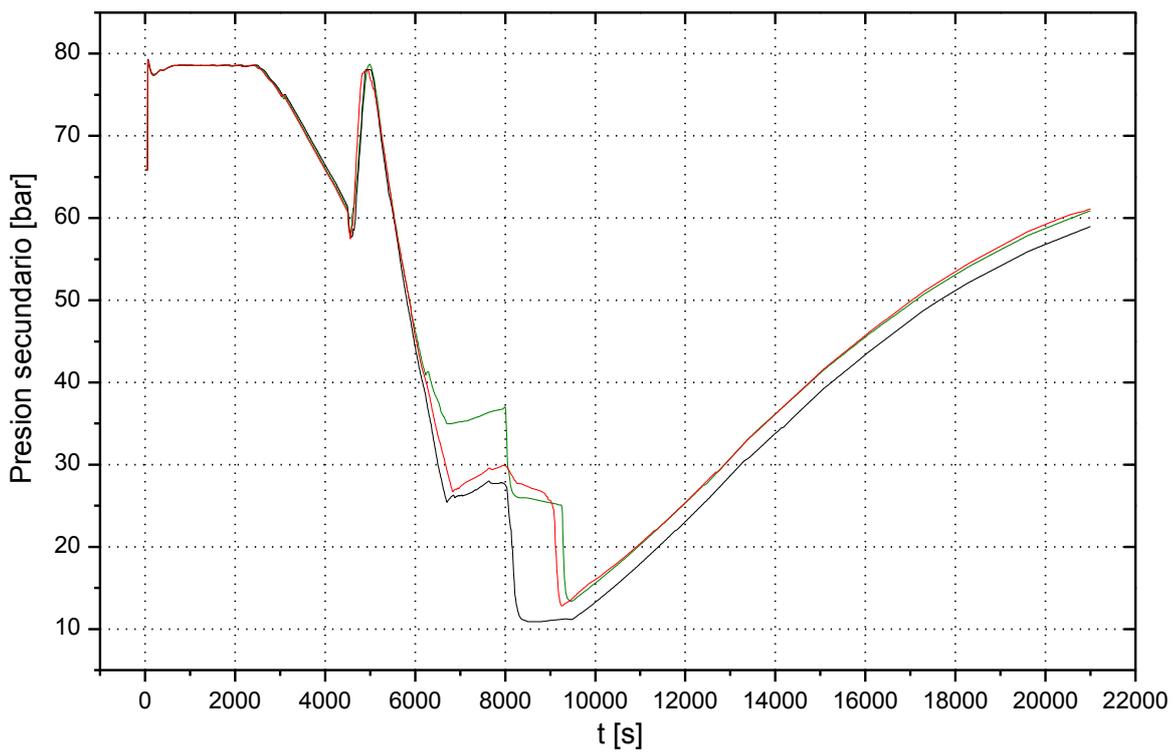


Figura. 6.40. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Presión en el secundario.

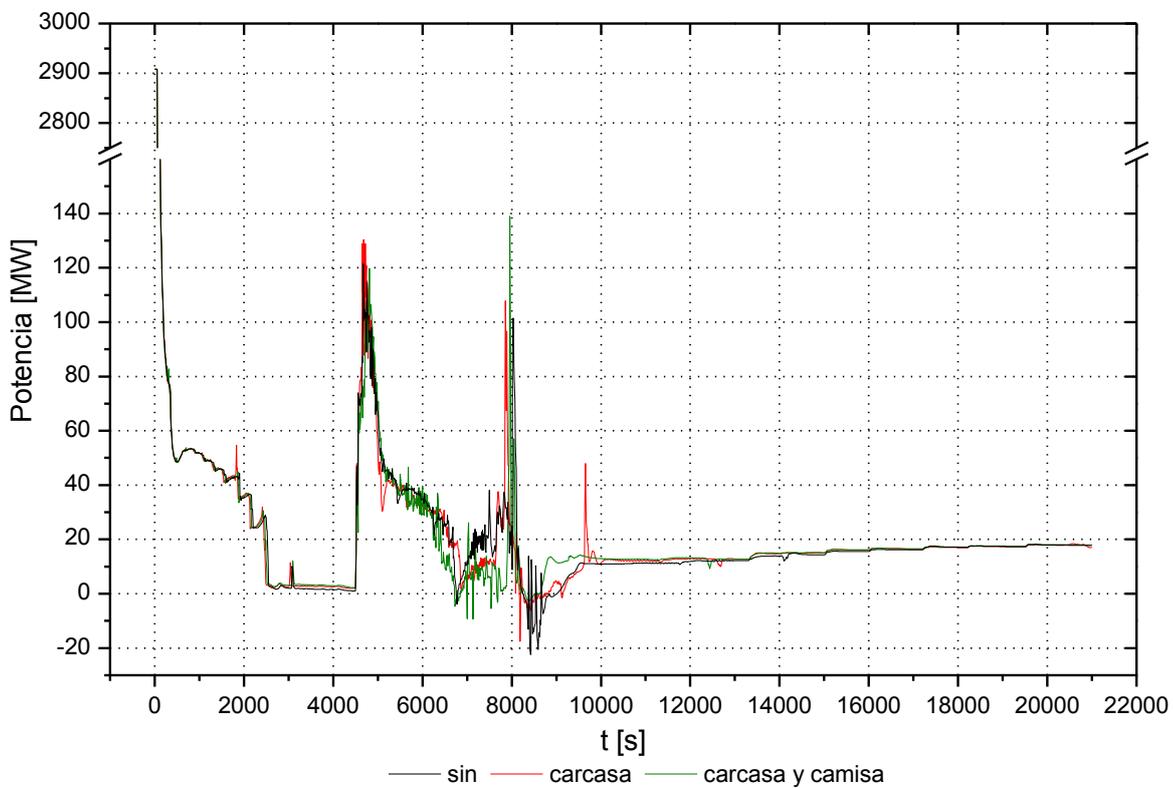


Fig. 6.41. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Transferencia primario-secundario.



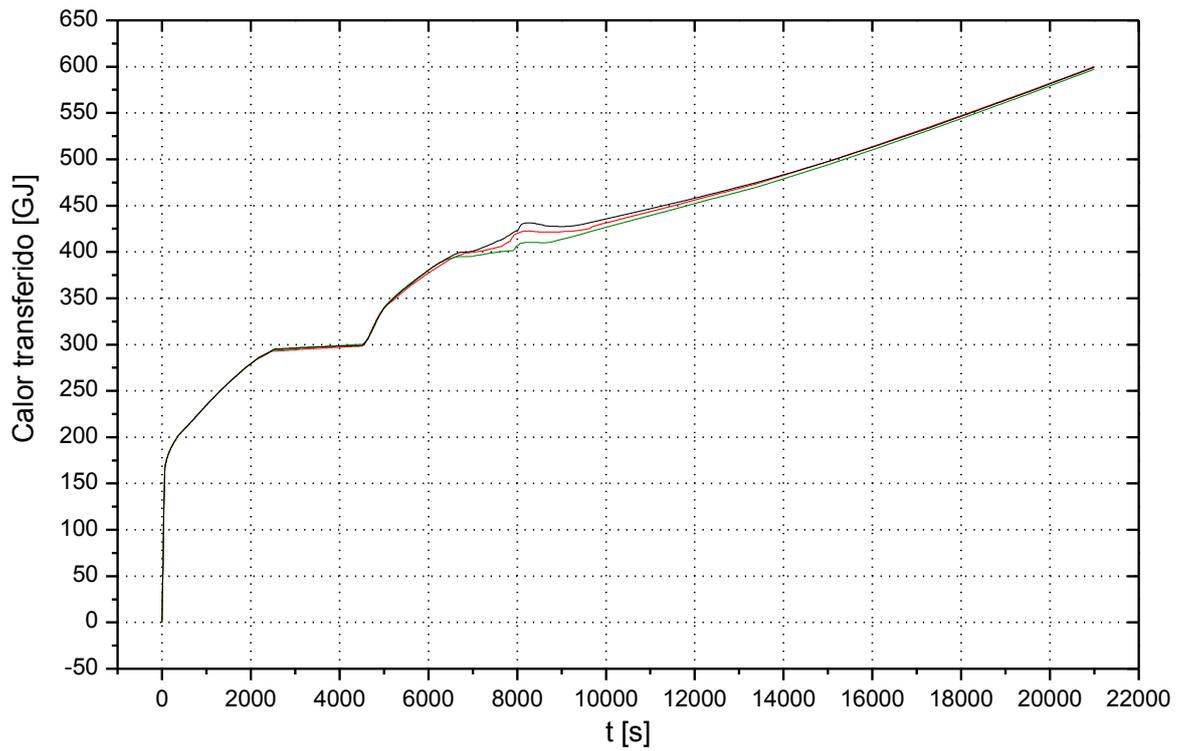


Fig. 6.42. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Calor transferido.

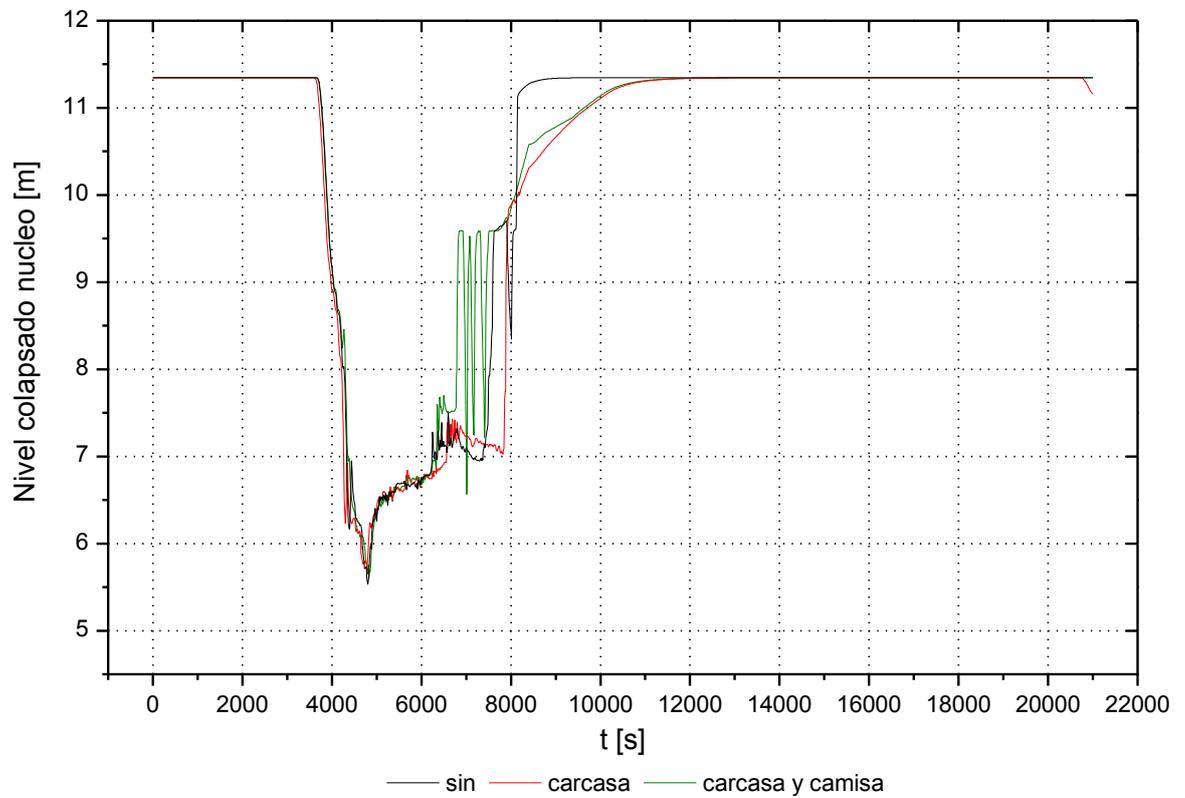


Figura 6.43. Pérdida total de agua de alimentación CNA: Nivel colapsado en el núcleo.



### 6.3.3. Conclusiones de la pérdida total de agua de alimentación.

Tras el estudio del transitorio de pérdida total de agua de alimentación podemos asegurar que el efecto de las estructuras de calor es poco relevante. Este es un transitorio donde el generador toma una gran importancia y aun así las diferencias, aunque son notables, no presentan presiones o temperaturas por encima de los valores conservadores. Es decir, se demuestra que con la nodalización actual, sin considerar las estructuras de calor, se obtienen resultados satisfactorios.

### 6.3.4. Documentación

- **Referencias**

Nota de cálculo del modelo de la C.N. Ascó para el programa RELAP5/MOD3. Marzo 2003.

NUREG/CR-5535-V2 (INEL-95/0174) "RELAP5/MOD3 code manual". Juny 1995.

Diagramas lógicos y de nodalitzación de la C.N. Ascó. Marzo 2003.

- **Archivos**

NOMBRE	CONTENIDO
BOL-ANA1008.inp	Modelo de la planta de Ascó (estacionario).
HScar_BOL-ANA1008.inp	Modelo de la CNA con la estructura carcasa.
HS_BOL-ANA1008.inp	Modelo de la CNA con las estructuras carcasa y camisa.
reduc_ANA.rst	
HScar_reduc.rst	Ficheros de resultados del estacionario.
HS_reduc.rst	
ANA_TR2.inp	
HScar-ANA_TR2.inp	Ficheros de entrada del transitorio.
HS-ANA_TR2.inp	

NOMBRE	CONTENIDO
--------	-----------



---

HS-ANA_TR2.out	
HScar-ANA_TR2.out	Ficheros de salida del transitorio.
HS-ANA_TR2.out	
<hr/>	
HS-ANA_TR2.rst	
HScar-ANA_TR2.rst	Ficheros de resultados del transitorio.
HS-ANA_TR2.rst	
<hr/>	
TR2.opj	Gráficos de los strips.

---

Tabla 6.44: Archivos generados para la simulación del transitorio de pérdida total de agua de alimentación.



## 7. Análisis de incorporar 5 tubos en U en los generadores de vapor

### 7.1. Introducción

Se pretende analizar la influencia de la nodalización de los 5.130 tubos en U del generador de vapor en el cálculo del tiempo del reestablecimiento de la circulación natural tras un LOCA pequeño (*loss of coolant accident*) traducido como accidente con pérdida de refrigerante. Se compararán dos nodalizaciones, la actual con un solo tubo y una más compleja, con 5 tubos en U a diferentes alturas.

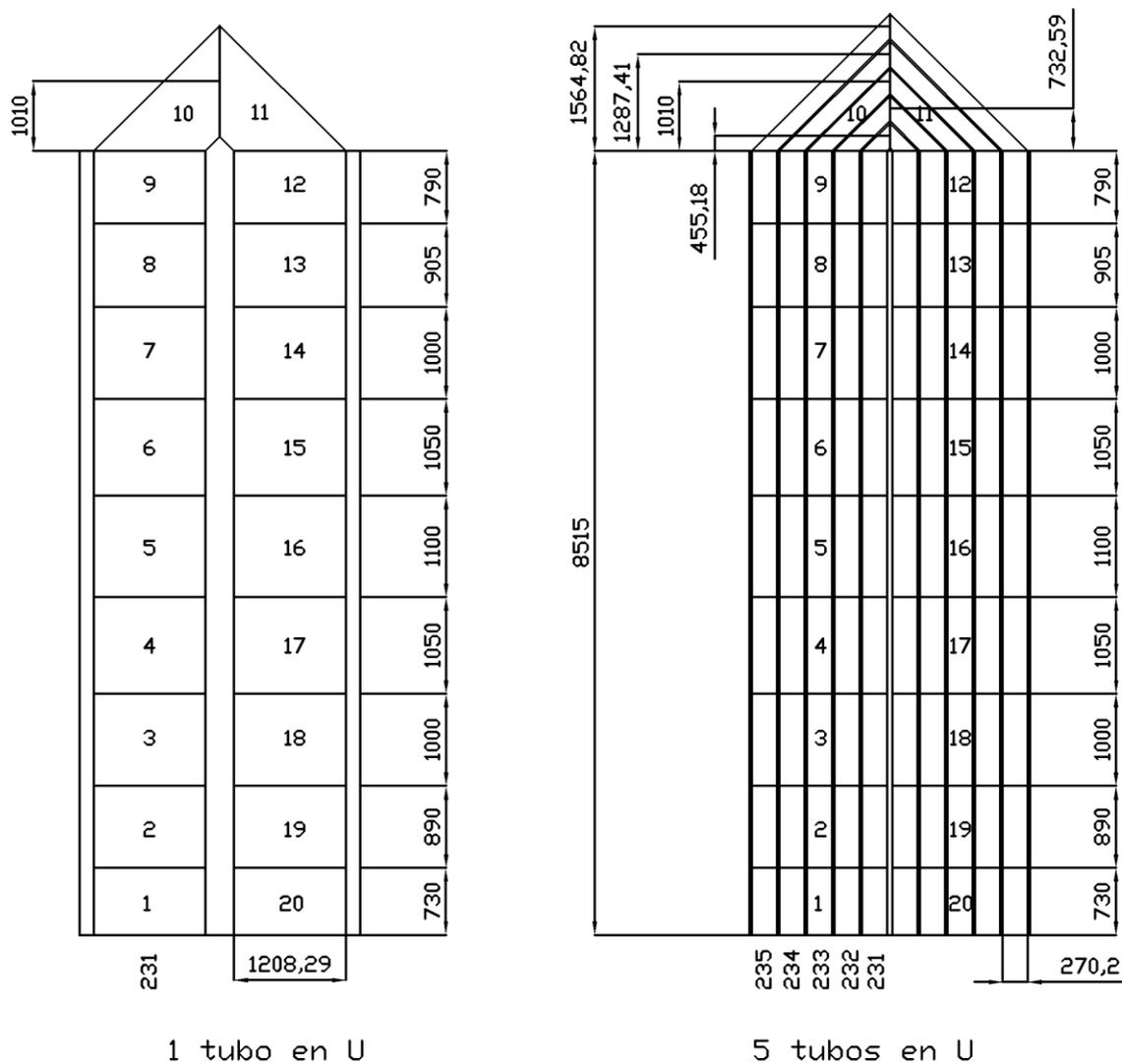


Figura 7.1: Nodalización de los tubos en U del generador de vapor 1.



Los 5.130 tubos en U de los generadores de vapor están modelados como un solo camino de flujo con una sección de paso igual a la del haz ( $1,14665 \text{ m}^2$ ) y por tanto una sola altura, que se corresponde con la altura intermedia del haz ( $1,01 + 8,515 \text{ m}$ ).

La nueva nodalización consiste en 5 tubos en U donde solo los subnodos 10 y 11 de cada tubo, igual que en la nodalización base, tienen una cierta inclinación ( $45^\circ$ ). Cada tubo tiene una sección de  $0,22933 \text{ m}^2$  (una quinta parte de la total) y por tanto un radio de  $0,27018 \text{ m}$ . Las alturas totales de los nodos 231, 233 y 235 corresponden respectivamente a la altura mínima, media y máxima del haz de tubos. Las alturas totales de los nodos 232 y 234 se corresponden con la cota intermedia entre los nodos 231-233 y 233-235 respectivamente.

Para realizar este estudio se ha utilizado el código RELAP5/MOD3.3, la versión posterior al RELAP5/MOD3.2, y para ello se incorporan las tarjetas necesarias para adaptar el *input* a la nueva versión además de aumentar ligeramente la presión de disparo de la turbobomba.

## 7.2. LOCA

### 7.2.1. Descripción del transitorio

La secuencia empieza con el reactor trabajando en operación normal al 100 % de potencia después de 12.000 segundos de transitorio nulo. Las variables estacionarias previas al transitorio son las correspondientes al ciclo 13 en condiciones BOL (*beginning of life*). Se postula el bloqueo de uno de los trenes de inyección y la indisponibilidad de los calentadores del presionador y del *steam-dump*.

En este punto se produce una rotura en el pleno inferior de la vasija del reactor de  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  y la pérdida de caudal provoca la parada del reactor (SCRAM) seguido por la turbina. Se detiene manualmente la carga y la descarga y se disparan las BRR's por subenfriamiento (figuras 7.2 y 7.3).

La inyección de seguridad (HPI) entra debido a la bajada de presión en el primario provocada por la pérdida de caudal. La presión del secundario desciende como consecuencia de una menor transferencia de calor primario-secundario tras un pico inicial que provoca la apertura de la válvula de alivio del GV. Se aísla el AAP y se regula manualmente el caudal del AAA de forma discretizada restableciendo así los niveles de rango estrecho de los generadores de vapor alrededor del 50% (figuras 7.4 -7.9 y 7.16).

El nivel de la vasija se mantiene cerca del nivel de las ramas y se recupera tras la entrada de la inyección de baja presión tras la cual también se restablece la recirculación natural (figuras 7.10, 7.11, 7.14 y 7.15). El procedimiento adoptado para responder a este transitorio resulta en una correcta refrigeración del núcleo (figuras 7.12 y 7.13).



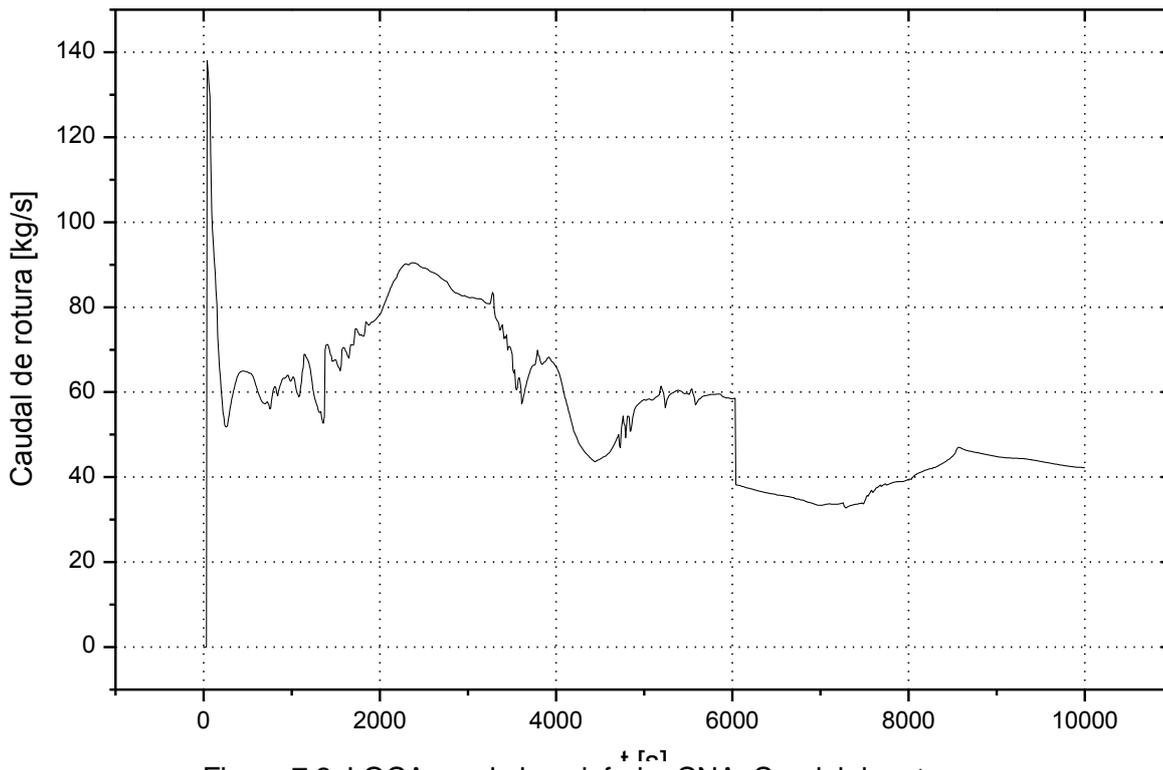


Figura 7.2. LOCA en el pleno inferior CNA: Caudal de rotura.

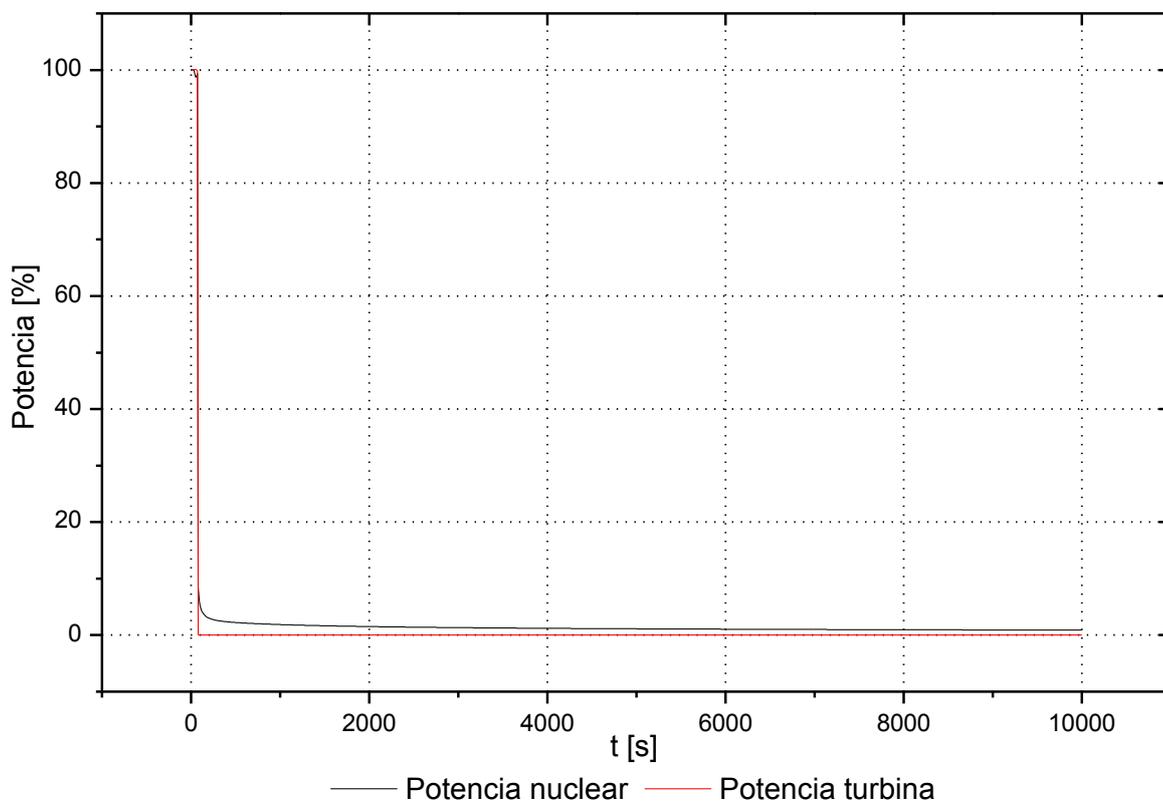


Figura 7.3. LOCA en el pleno inferior CNA: Potencia nuclear y de la turbina.



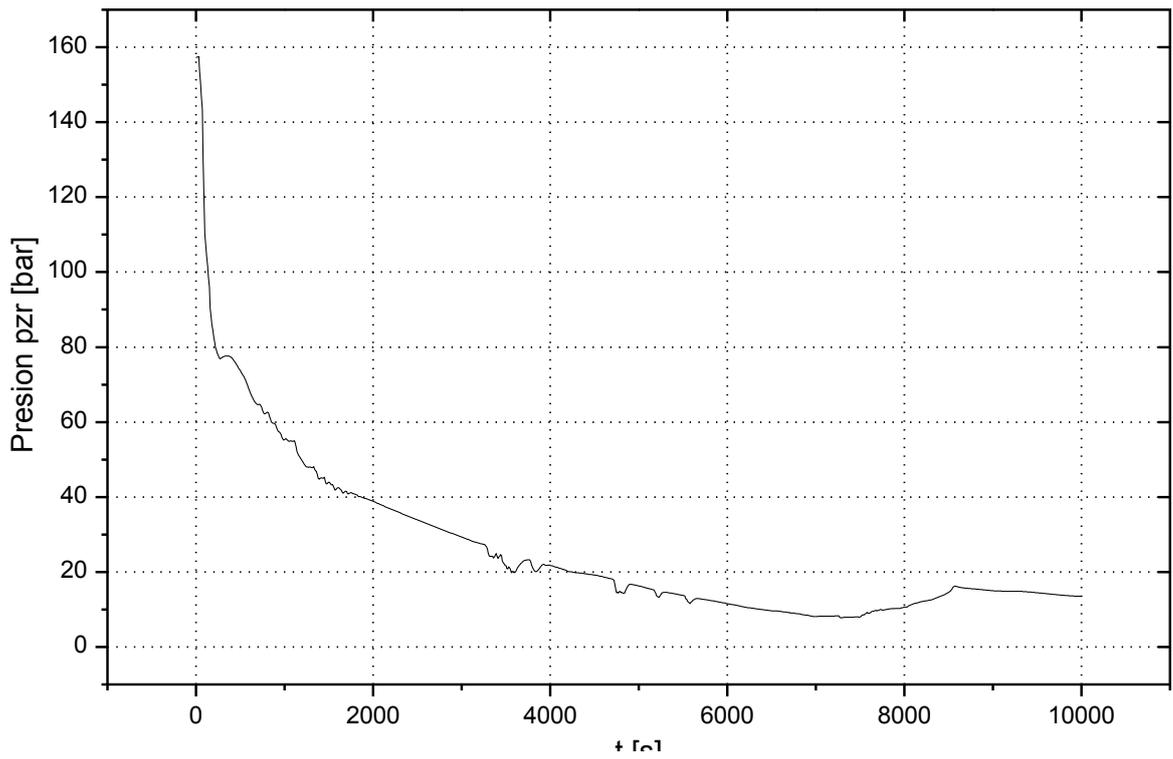


Figura 7.4. LOCA en el pleno inferior CNA: Presión en el presionador.

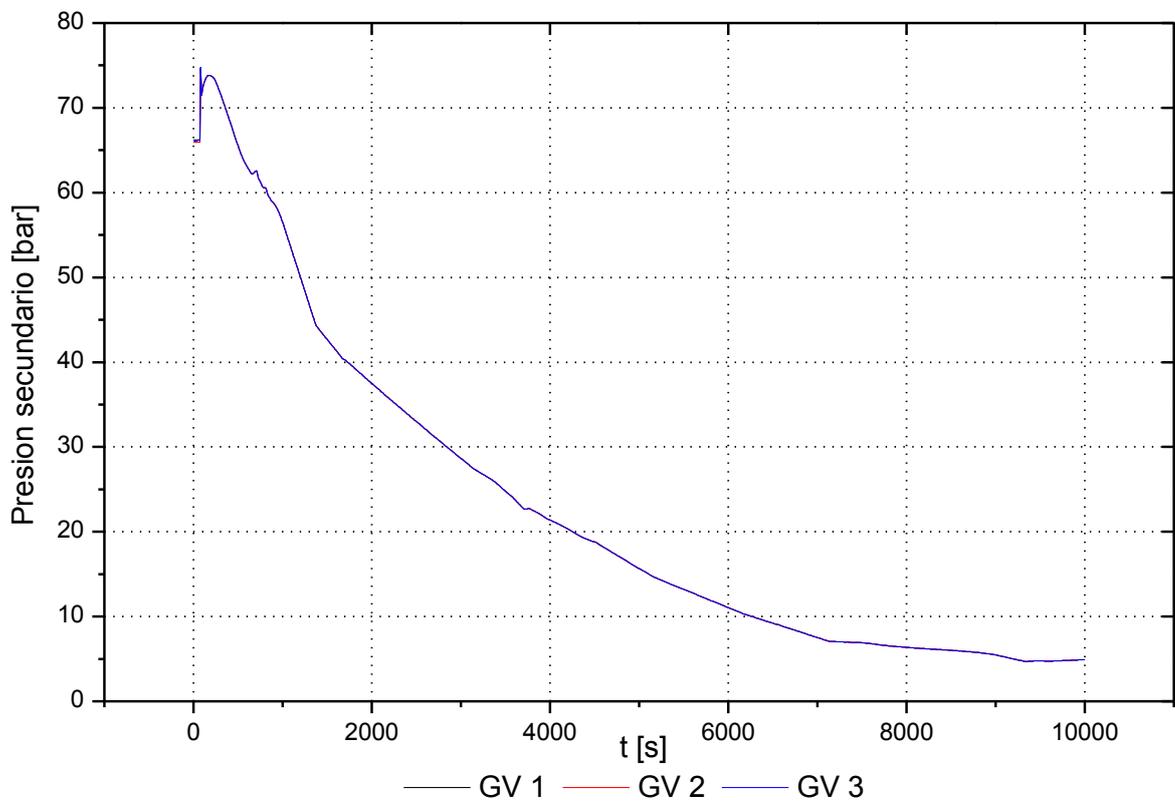


Figura 7.5. LOCA en el pleno inferior CNA: Presión del secundario.



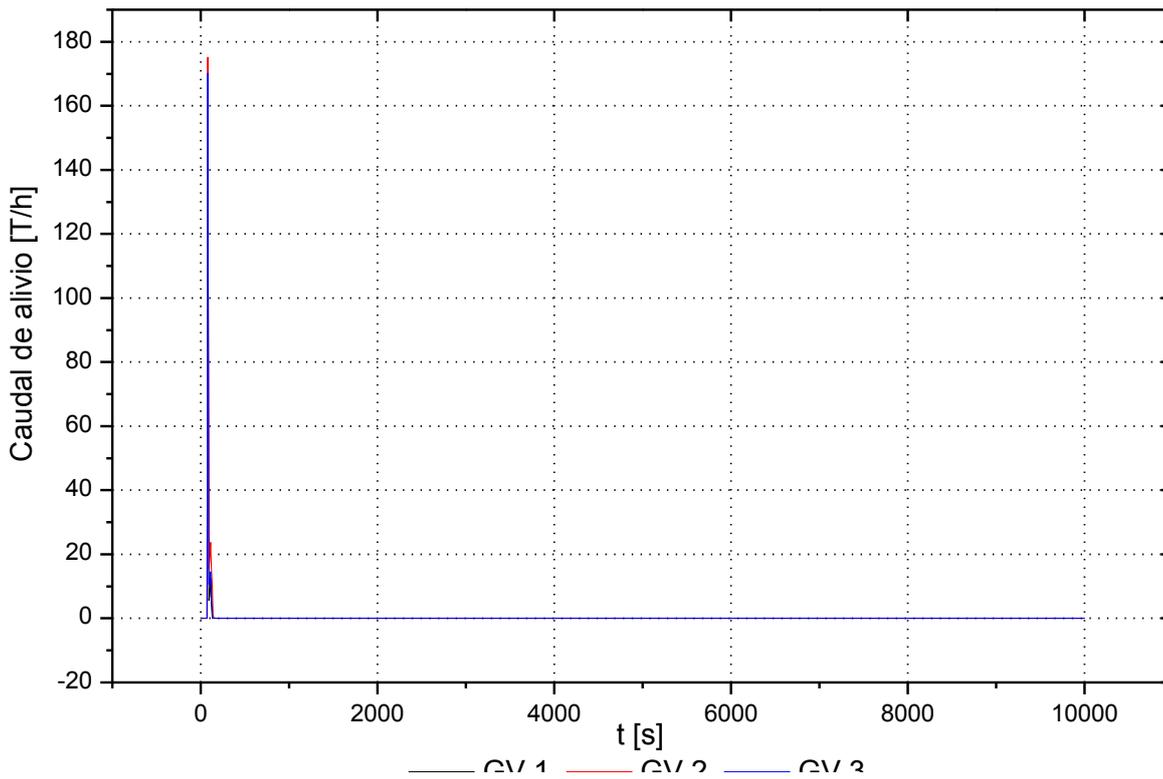


Figura 7.6. LOCA en el pleno inferior CNA: Caudal de alivio de los generadores de vapor.

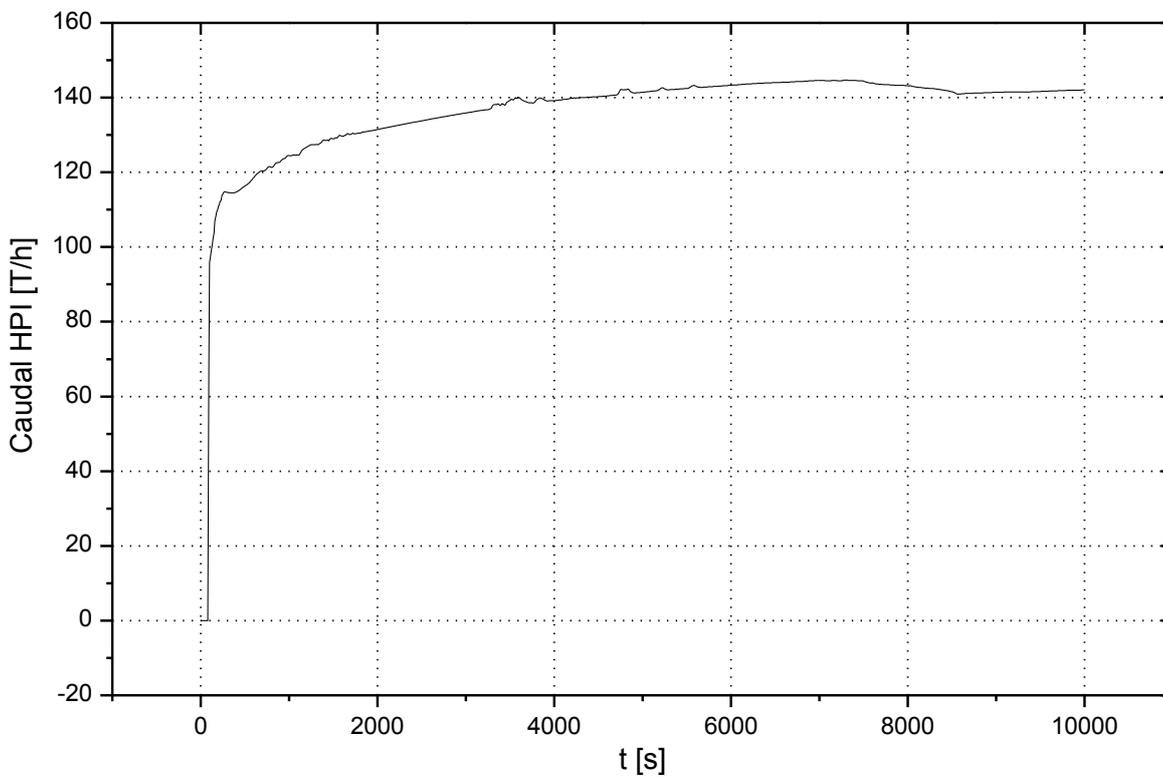


Figura 7.7. LOCA en el pleno inferior CNA: Caudal de inyección de alta presión.



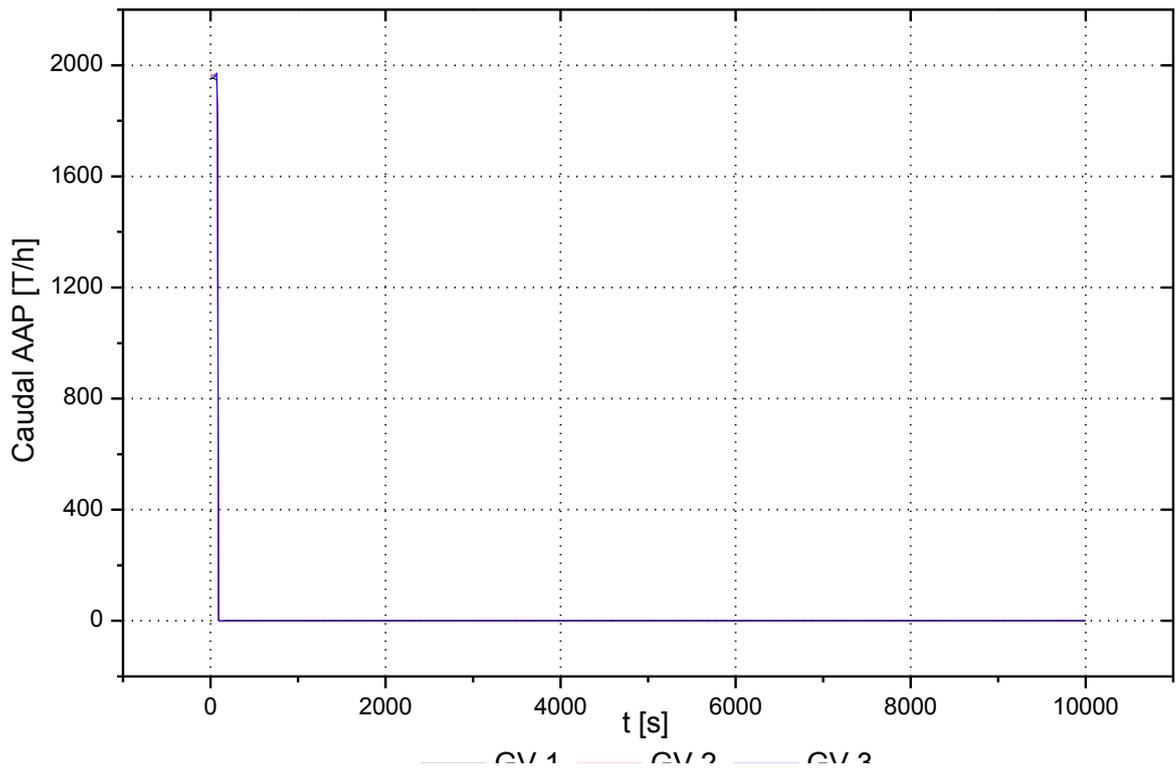


Figura 7.8. LOCA en el pleno inferior CNA: Caudal de agua de alimentación principal.

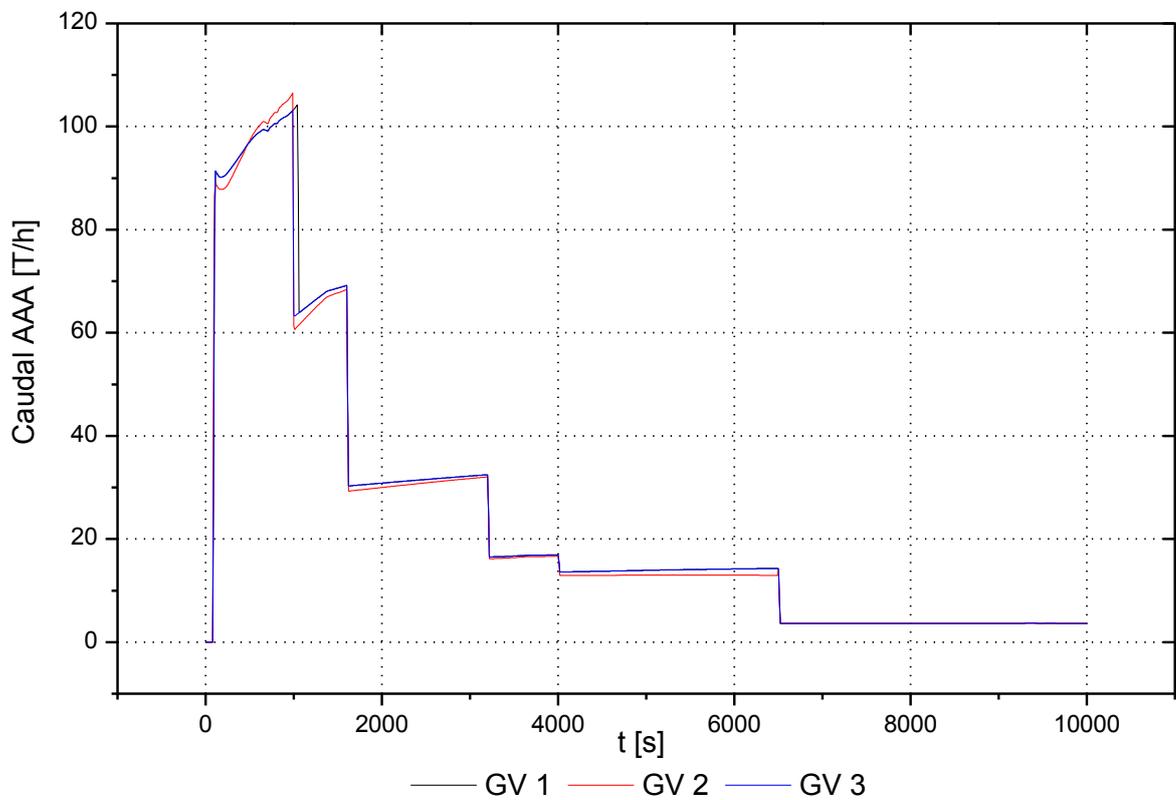


Figura 7.9. LOCA en el pleno inferior CNA: Caudal de agua de alimentación auxiliar.



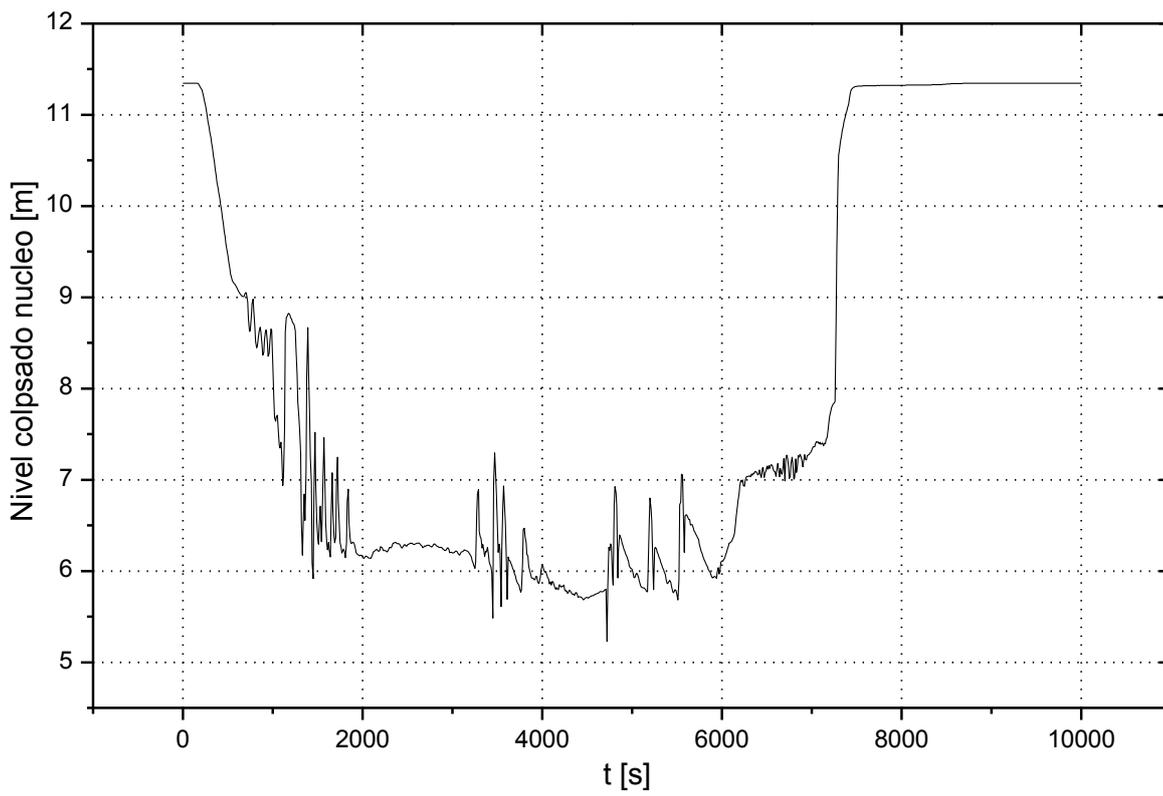


Figura 7.10. LOCA en el pleno inferior CNA: Nivel colapsado en el núcleo.

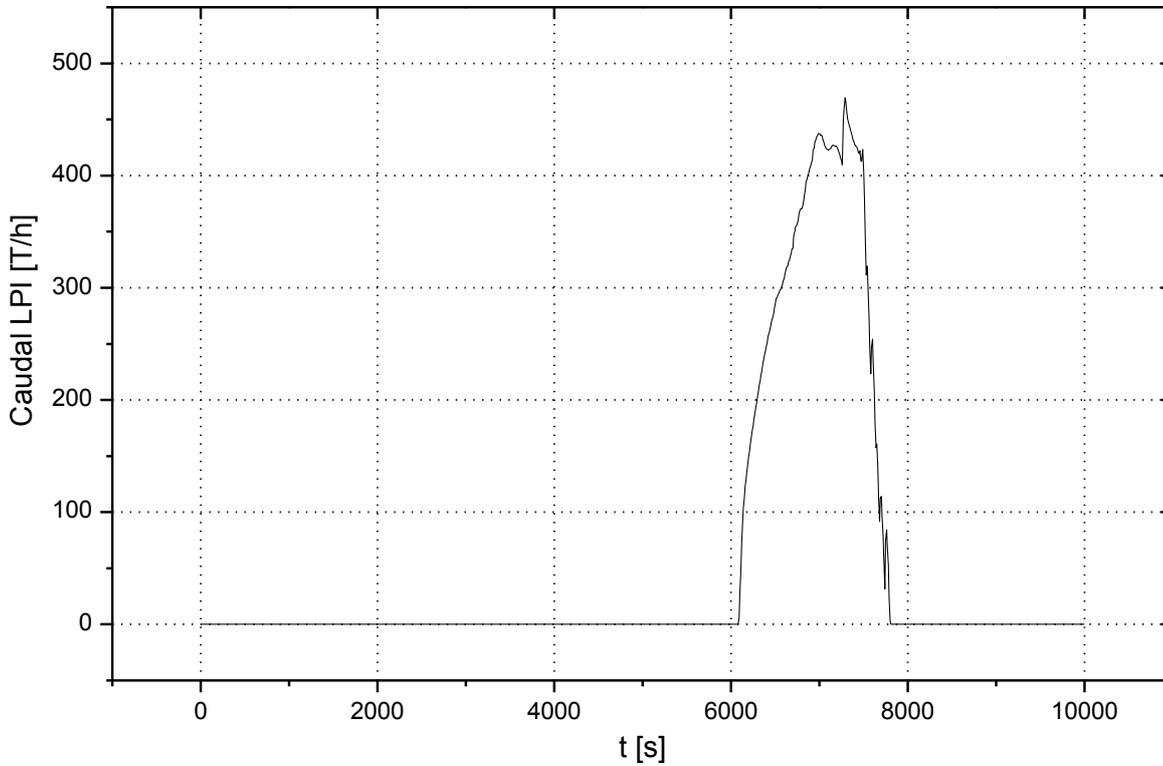


Figura 7.11. LOCA en el pleno inferior CNA: Caudal de inyección de baja presión.



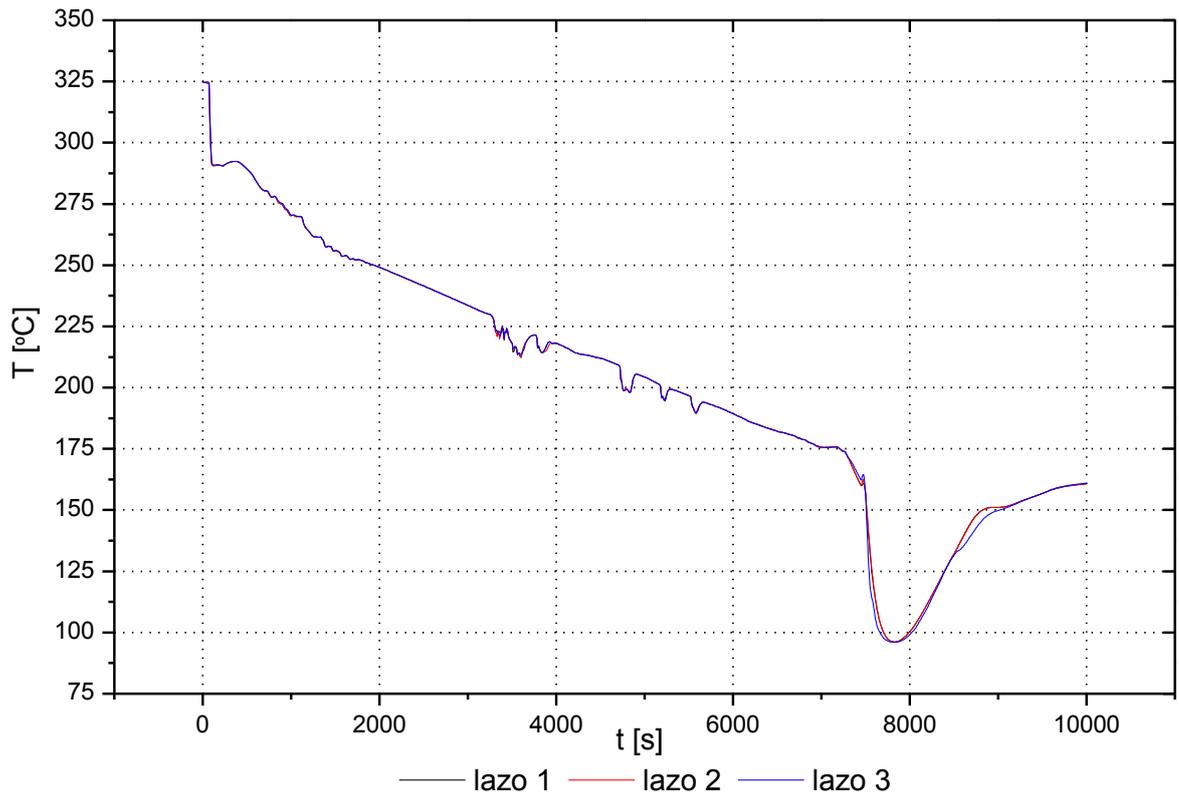


Figura 7.12. LOCA en el pleno inferior CNA: Temperaturas calientes de los tres lazos.

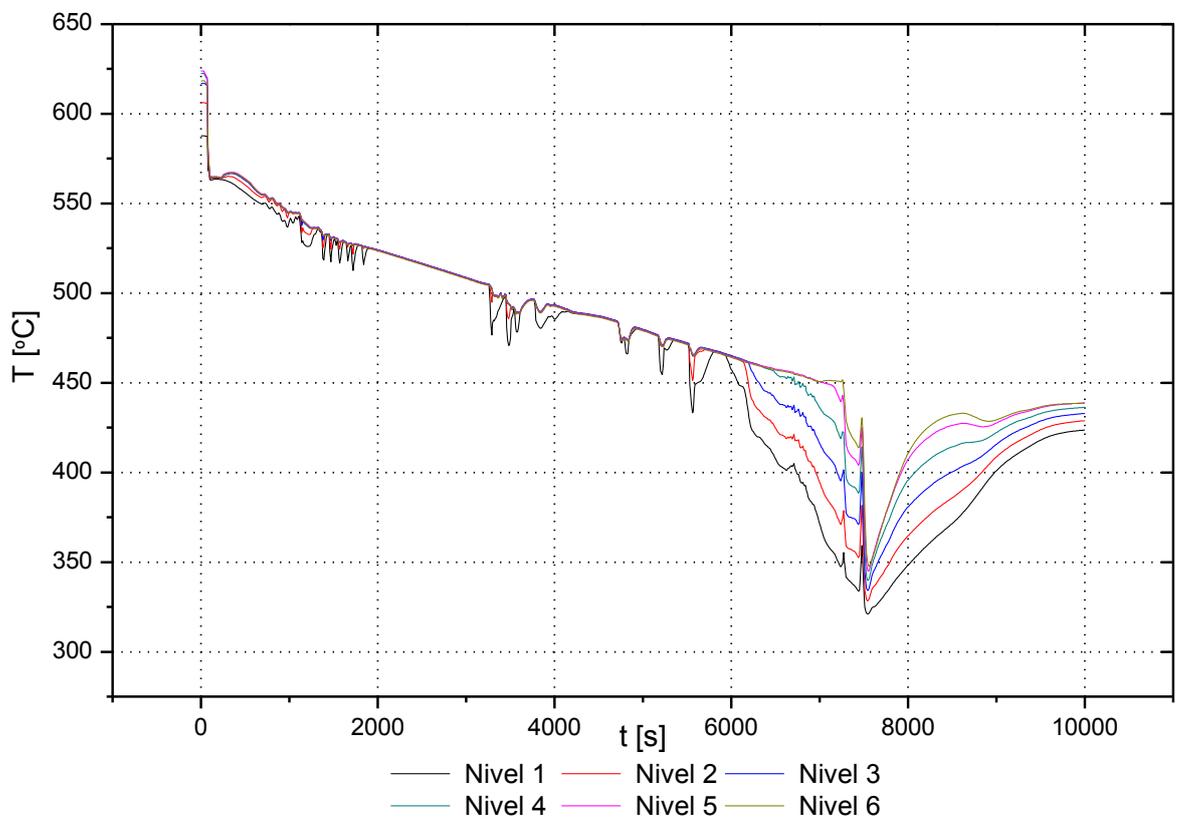


Figura 7.13. LOCA en el pleno inferior CNA: Temperatura vaina caliente.



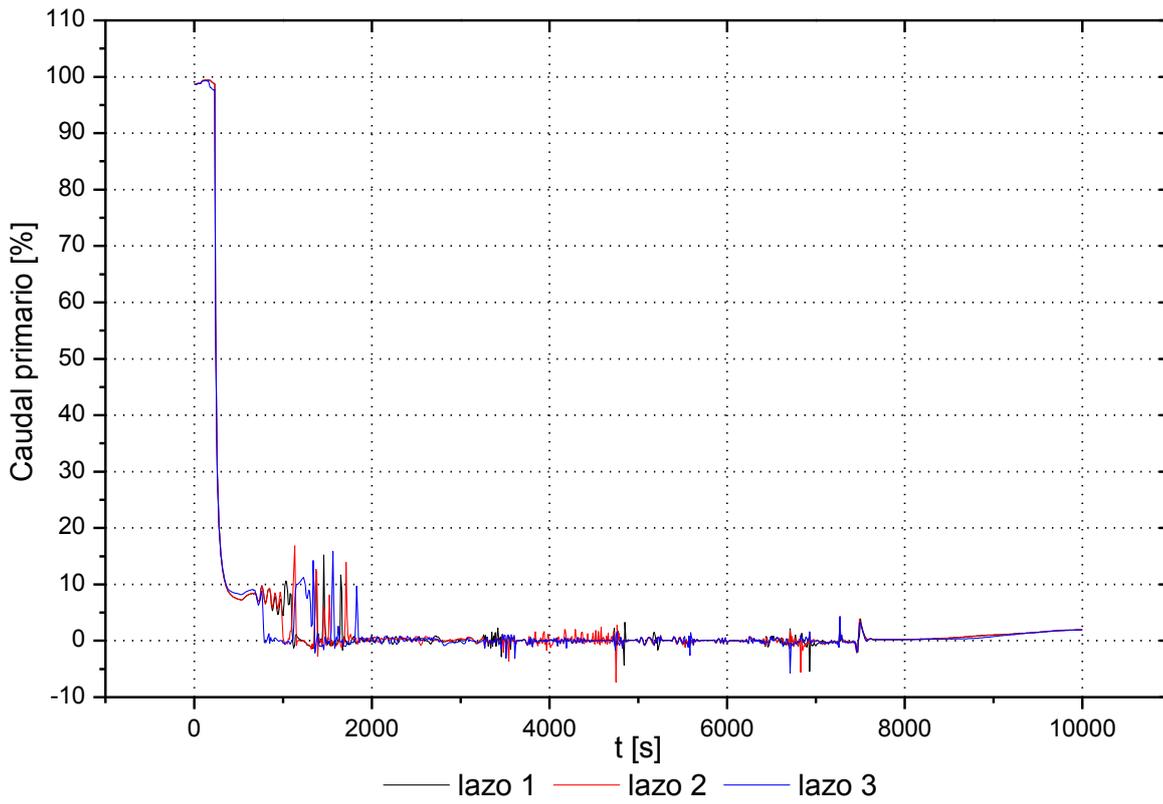


Figura 7.14. LOCA en el pleno inferior CNA: Caudal primario.

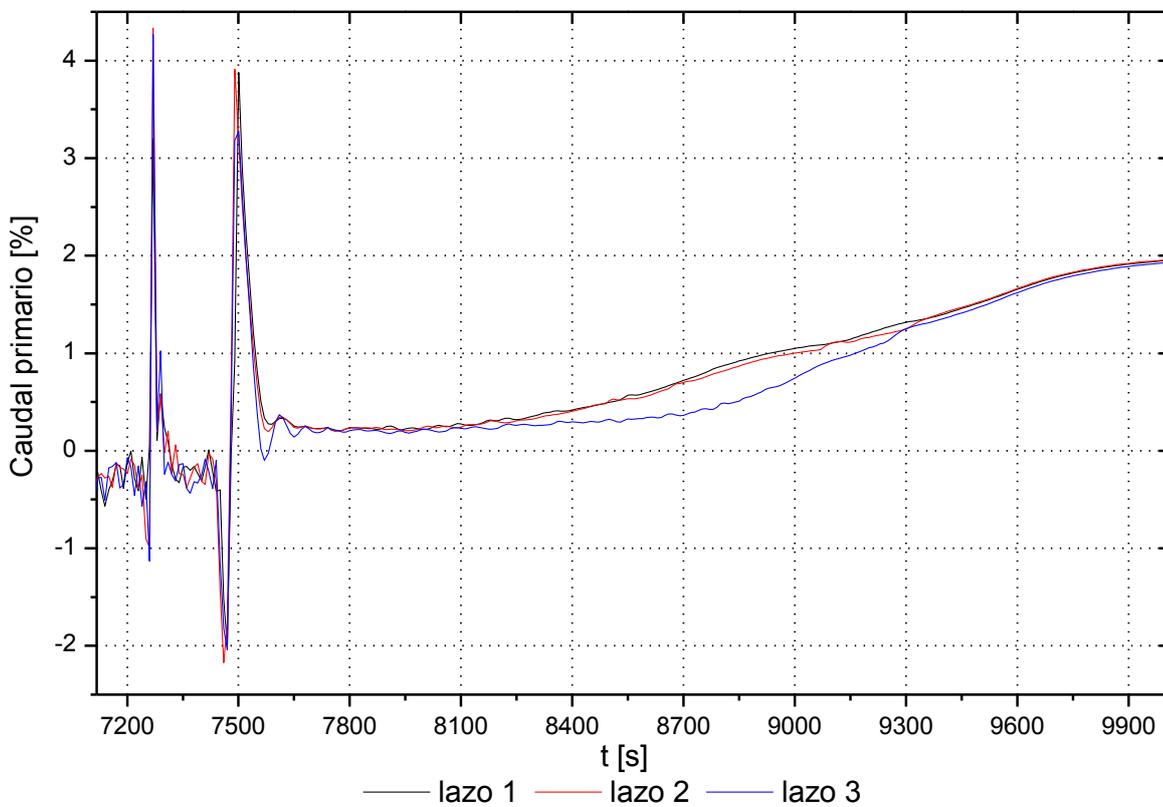


Figura 7.15. LOCA en el pleno inferior CNA: Establecimiento de la circulación natural.



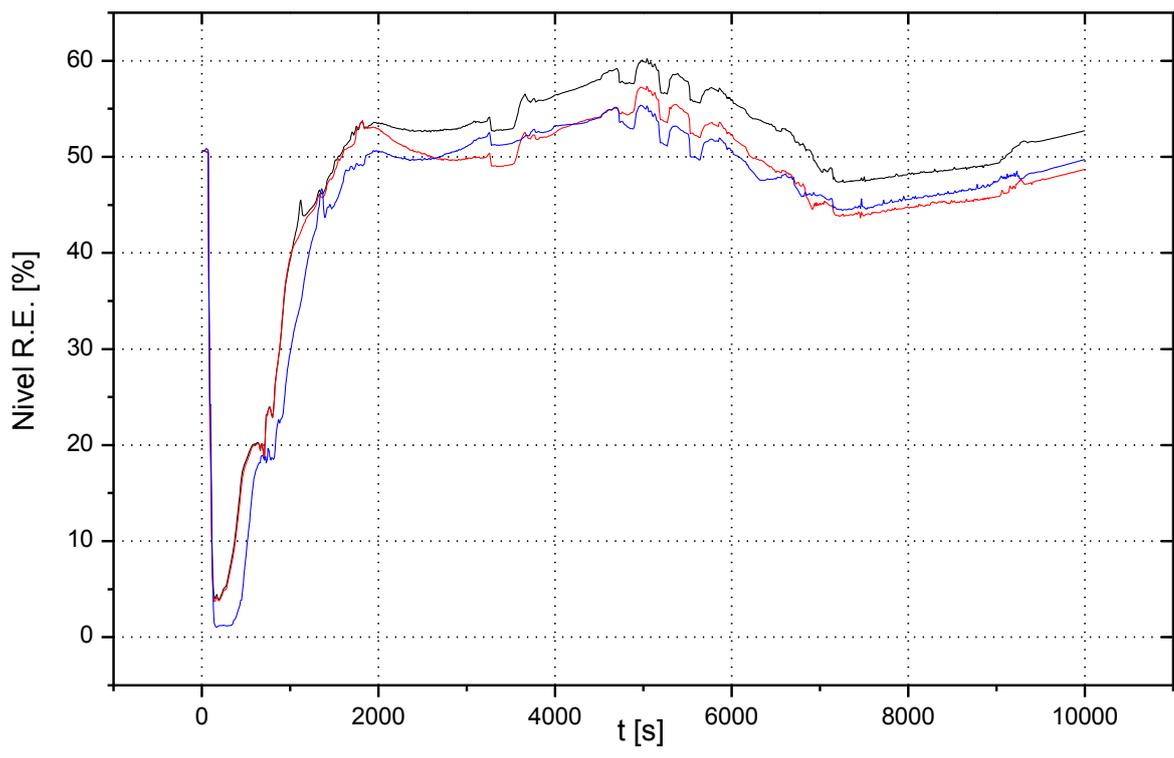


Figura 7.16. LOCA en el pleno inferior CNA: Nivel de rango estrecho de los GV.

En la tabla 7.17 se observa la cronología del transitorio de LOCA en el pleno inferior:

TIEMPO ( SEGUNDOS )	EVENTO
30	Loca en el pleno inferior.
50	Parada de la bomba de carga.
80	Entrada HPI.
180	Aislamiento del AAP.
230	Parada de las BRR's por subenfriamiento.
6080	Entrada de LPI.
6500	Apertura válvulas interconexión y cierre TBAAA.
7570	Reestablecimiento de la circulación natural.
10000	Fin del transitorio.

Tabla 7.17. Cronología del transitorio de LOCA en el pleno inferior.



### 7.2.2. Comparativa de resultados

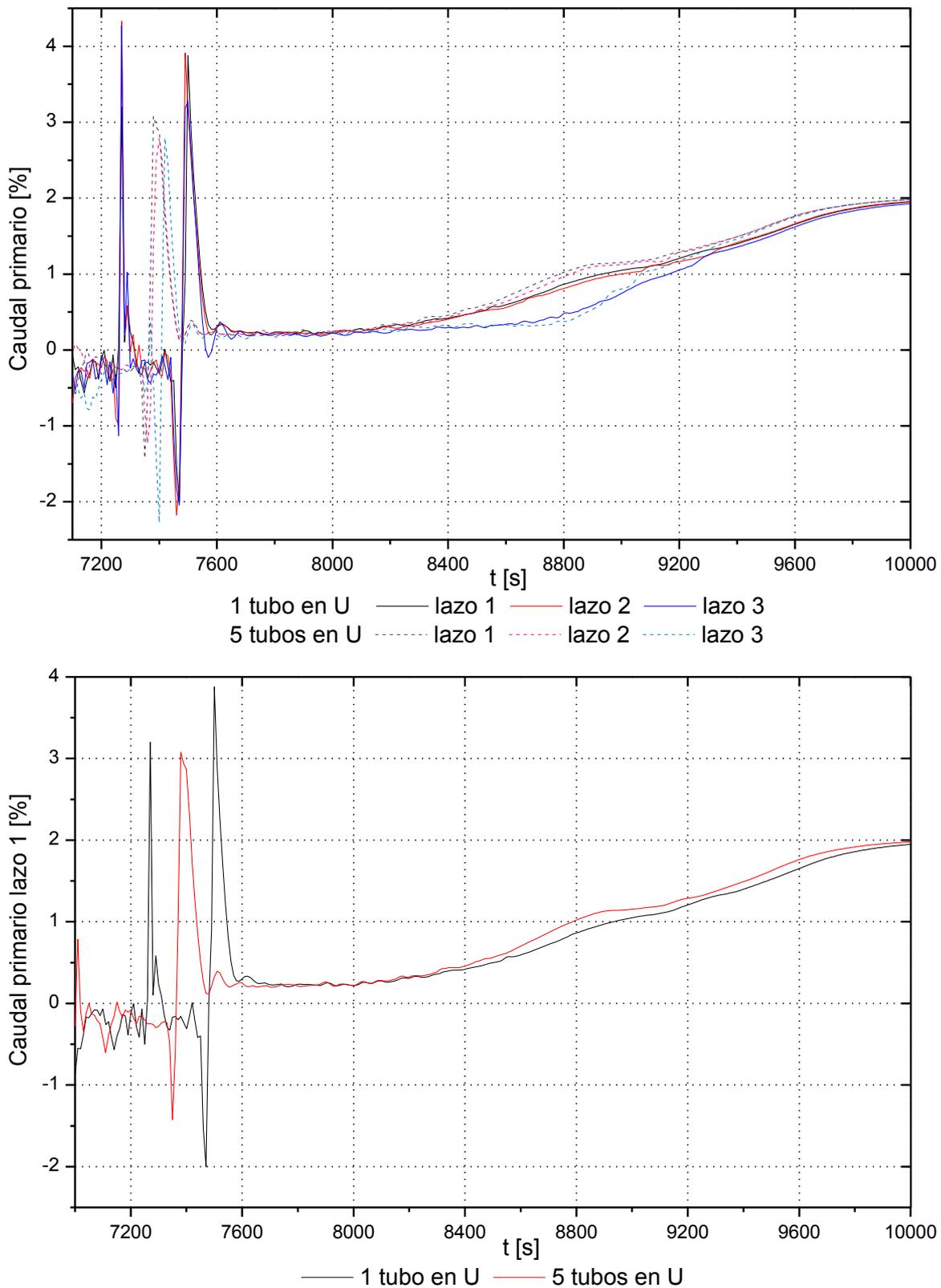


Figura 7.18/19. LOCA en el pleno inferior CNA: Reestablecimiento de la circulación natural.



Tras la incorporación de los 5 tubos en U se observa que el reestablecimiento de la circulación natural se adelanta cien segundos con respecto al modelo base (figura 7.18/19)

La rotura de  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  que se produce en el pleno inferior de la vasija y la consecuente pérdida de refrigerante provoca que el nivel del agua permanezca por debajo de la altura de las ramas. Tras la entrada del LPI este nivel aumenta progresivamente hasta condensar todo el refrigerante siendo la última zona en condensar la correspondiente a la cota más alta de los tubos en U (figura 7.20).

Considerando cada tubo individualmente se reinundan primero los nodos inferiores, siendo de forma alternada entre lado caliente y lado frío, esto es, para los nodos superiores primero el subnodo 9, luego el 12 y por último los subnodos 10 y 11 (figura 7.21). Esto es debido a la diferencia de densidades del refrigerante del circuito primario que inunda la rama fría y la rama caliente.

La condensación en estos nodos precede al reestablecimiento de la circulación natural.

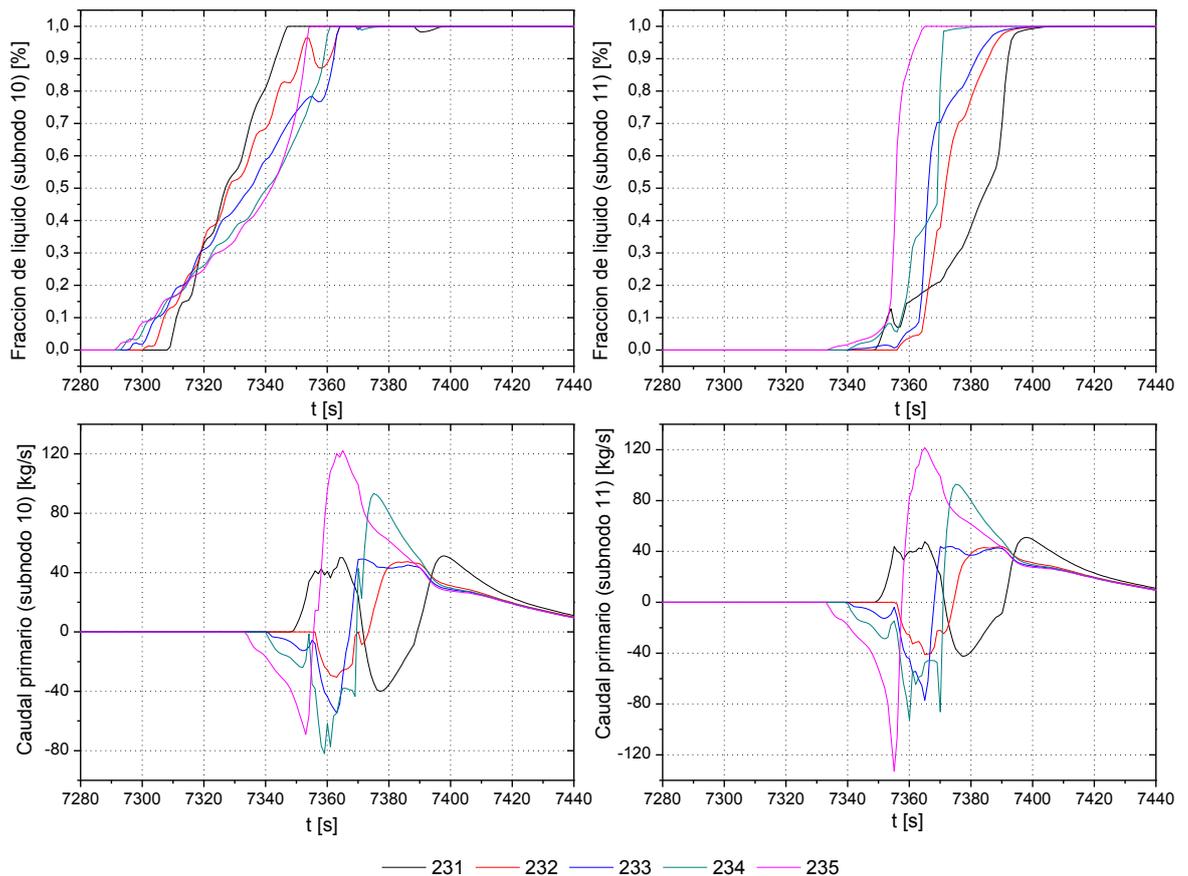


Figura 7.20. LOCA en el pleno inferior CNA: Reestablecimiento de la circulación natural con 5 tubos en U. Caudal primario y fracción de líquido en los subnodos 231-10/11..235-10/11.



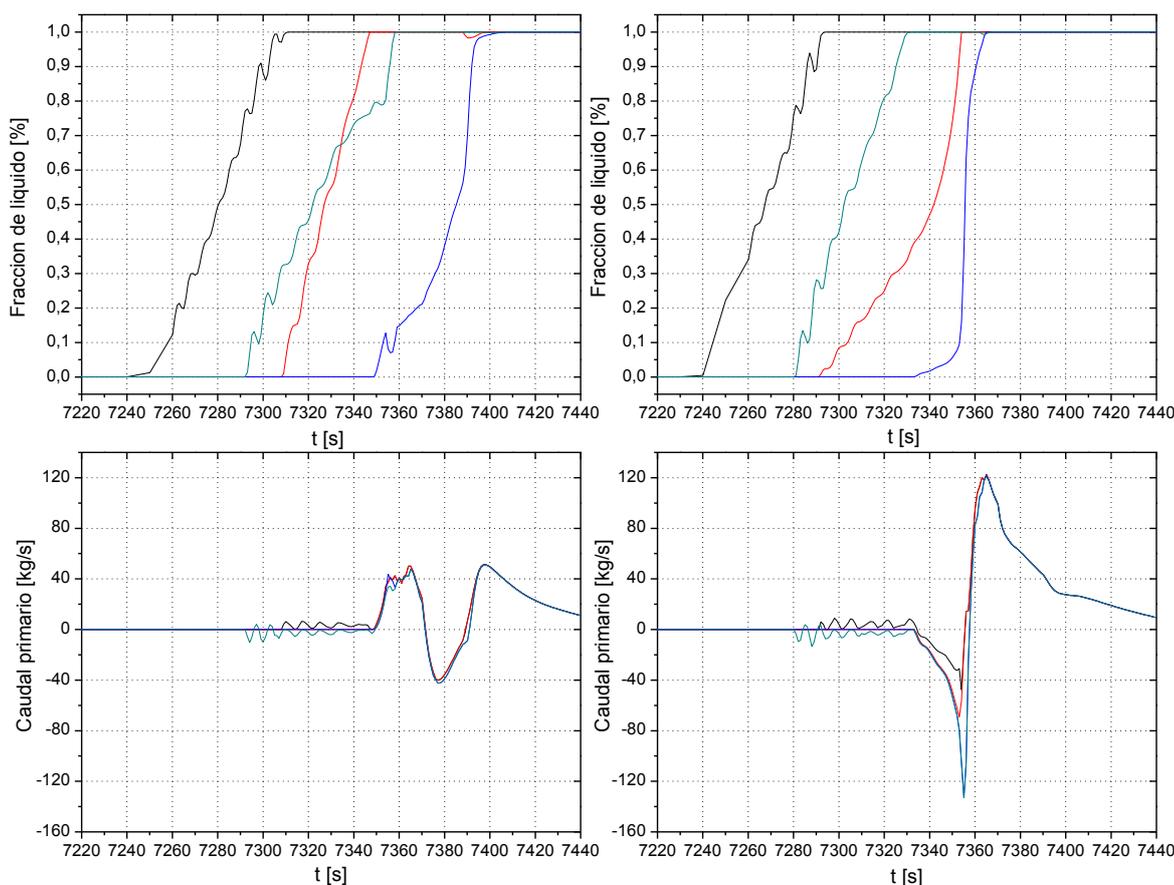


Fig. 7.21. LOCA en el pleno inferior CNA: Reestablecimiento de la circulación natural en los tubos 231 y 235. Caudal primario y fracción de líquido en los subnodos 231/5-09..231/5-12.

La transferencia de calor entre primario y secundario es superior en el tubo de mayor longitud y por tanto el vapor condensa en el tubo largo en primer lugar, a los 7.370 segundos versus los 7.410 segundos que tarda en condensar todo el vapor en el nodo con menos cota, el 231. La circulación natural se reestablece tras ser la fracción de líquido igual a uno en todos los nodos (figura 7.21).

Los cinco tubos en U, nodos 231..235 de menor a mayor longitud, comparten los volúmenes de entrada y salida y en consecuencia la caída de presión por cada uno de ellos debe ser la misma. Dado que los tubos difieren en su longitud, pero no en la sección de paso, es evidente que el caudal que debe circular, y por lo tanto la velocidad del fluido, en el tubo largo es inferior al inmediatamente más corto y así sucesivamente.

En definitiva, tras la conversión a líquido de todos los nodos del primario se establece la circulación natural, a los 7.470 s en el caso de modelar los tubos en U con cinco alturas diferentes y a los 7.570 s si se modela como un único camino de flujo y esto es, aproximadamente, 60 s después de condensar el subnodo 11 del nodo 231 (figura 7.22).



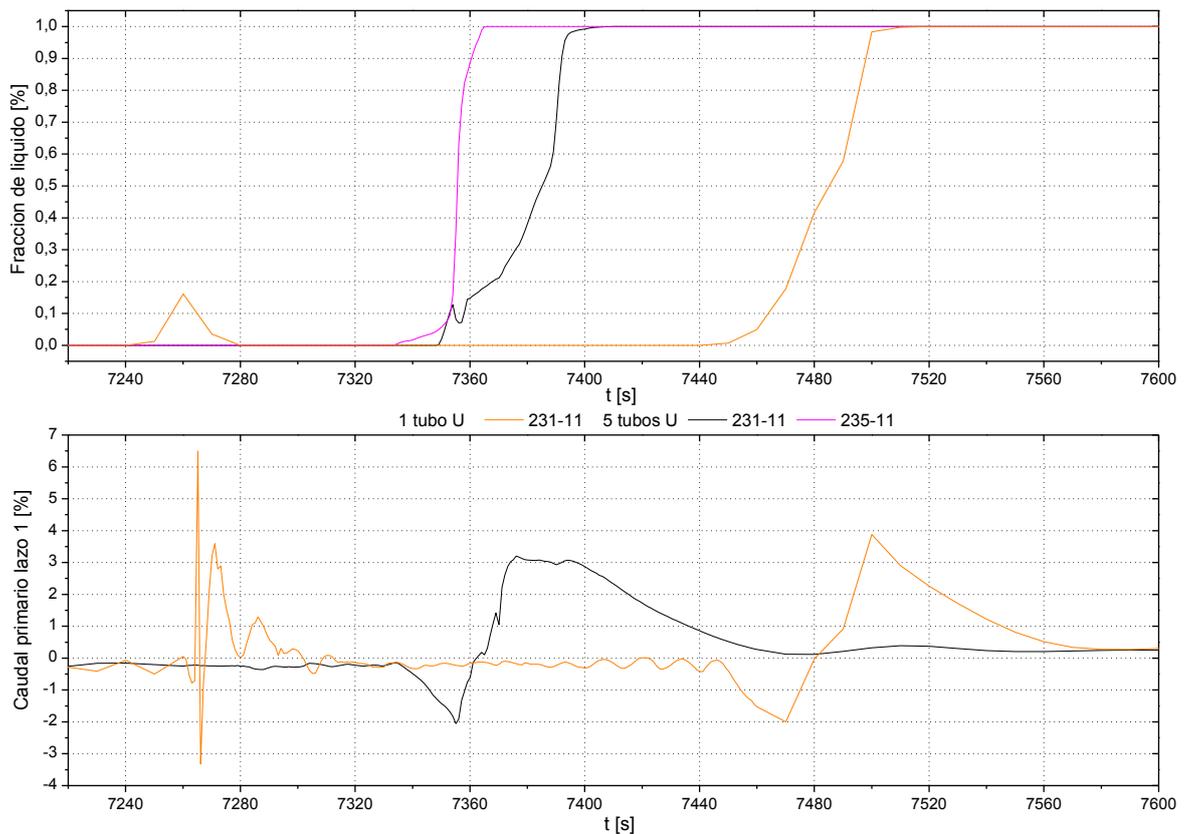


Figura 7.22. LOCA en el pleno inferior CNA: Caudal primario en el lazo 1 y fracción de líquido en los subnodos 231-11, 235-11 para 5 tubos en U y 231-11 para 1 tubo en U.

### 7.2.3. Conclusiones

El estudio del reestablecimiento de la circulación natural toma una gran importancia tras un LOCA donde el nivel del núcleo se estabilice a la altura de las ramas. Esto es debido a la formación de bolsas de agua poco borada tras la condensación que aporta reactividad en el núcleo tras el reestablecimiento de la circulación natural.

El estudio que se presenta demuestra que el modelo actual, que representa los 5.130 tubos en U como un único nodo de sección de paso equivalente a la del haz y una cota máxima correspondiente a la altura intermedia del haz, se acerca a los resultados obtenidos con la nodalización más detallada y por tanto, no es necesario añadir complejidad al modelo. La nodalización actual es perfectamente válida.



## 7.2.4. Documentación

- **Referencias**

Nota de cálculo del modelo de la C.N. Ascó para el programa RELAP5/MOD3. Marzo 2003.

NUREG/CR-5535-V2 (INEL-95/0174) "RELAP5/MOD3 code manual". Juny 1995.

Diagramas lógicos y de nodalitzación de la C.N. Ascó. Marzo 2003.

- **Archivos**

<b>NOMBRE</b>	<b>CONTENIDO</b>
BOL-ANA1008.i	Modelo de la planta de Ascó (estacionario).
5U_BOL-ANA1008.i	Modelo de la CNA con 5 tubos en U en los GV.
reduc_ANA.r	Ficheros de resultados del estacionario.
5U_reduc_ANA.r	
ANA_TR3.i	Ficheros de entrada del transitorio.
5U_ANA_TR3.i	
ANA_TR3.o	Ficheros de salida del transitorio.
5U_ANA_TR3.o	
ANA_TR3.r	Ficheros de resultados del transitorio.
5U_ANA_TR3.r	
TR3.opj	Gráficos de los strips.

Tabla 6.23: Archivos generados para la simulación del transitorio de LOCA en el pleno inferior.



## 8. Conclusiones

El presente estudio ha permitido consolidar varios aspectos del actual modelo de generador de vapor que se habían identificado como posibles mejoras.

Se ha mostrado que la modificación de los parámetros ficticios de control que regulan la temperatura del agua de alimentación principal no mejora el comportamiento del generador de vapor, es decir, no produce una convergencia significativa entre los resultados de la simulación y el comportamiento real.

La incorporación de estructuras de calor en la camisa y la carcasa de los generadores de vapor proporciona una descripción más detallada de los fenómenos de transferencia de calor. Los resultados señalan un peor comportamiento como sumidero de calor del generador de vapor, sin embargo el comportamiento general de la planta no sufre cambios significativos que justifiquen la complejidad añadida al modelo, a pesar de haberse analizado el transitorio accidental más desfavorable para éstos.

Modelar los tubos en U del generador de vapor como una configuración de cinco nodos, en lugar del modelo base que consta de un único nodo, supone un adelanto de 100 segundos en el reestablecimiento de la circulación natural tras un LOCA pequeño. Este adelanto no es significativo enmarcado en un escenario de 10.000 segundos y por tanto, se desestima la incorporación de más nodos que modelan la descripción de los tubos en U.

A la vista de todos los resultados obtenidos tras los cambios introducidos, se puede afirmar que el modelo actual de generador de vapor es adecuado por su simplicidad y correcto en los resultados.





## 9. Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer al Sr. Francesc Reventós, director de este proyecto, la confianza aportada, su disponibilidad y su paciencia.

Agradezco también a Jose Luis Modrego el apoyo incondicional dedicado durante todos estos años de carrera y en especial durante la realización de este proyecto.

A mi familia por tirar de mí siempre hacia delante con tenacidad y esfuerzo.

A Carles Llopis por las horas perdidas durante el inicio del proyecto y a los compañeros de las sala de becarios.

A mis amigos cómplices de este largo viaje, en especial a Ana Vilafranca.





## 10. Bibliografía

### Referencias bibliográficas

- [1] IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY. *RELAP5/MOD3.2 code manual volume V. User's guidelines*. Idaho Falls, Diciembre 2001.
- [2] IDAHO NATIONAL ENGINEERING LABORATORY. *RELAP5/MOD3.2 code manual volume II. Appendix A input requeriments*. Idaho Falls, Enero 2002.
- [3] SECCIÓ D'ENGINYERIA NUCLEAR (UPC). ÀREA D'ESTUDIS TERMOHIDRÀULICS. *Nota de càlculo del modelo de la C.N. Ascó con RELAP*. Barcelona, Julio 2003.
- [4] BAILO CALLEJON, M. PFC. *Preparación de un procedimiento para la ejecución de cálculos de seguridad y operación para el apoyo a la explotación de una central nuclear con modelos integrales de planta*. Barcelona, Noviembre 2007.
- [5] SECCIÓ D'ENGINYERIA NUCLEAR (UPC). ÀREA D'ESTUDIS TERMOHIDRÀULICS. *Validación del modelo de CN Ascó con RELAP5/MOD3.2*. Barcelona, Setiembre 2003.
- [6] SECCIÓ D'ENGINYERIA NUCLEAR (UPC). ÀREA D'ESTUDIS TERMOHIDRÀULICS. *Validación del modelo de CN Vandellós II con RELAP5/MOD3.2*. Barcelona, Setiembre 2003.
- [7] RIOS RODRIGUEZ, M. PFC. *Estudi de transitoris de pèrdua total d'aigua d'alimentació per a centrals PWR*. Barcelona, Abril 2005.
- [8] CENTRAL NUCLEAR ASCÓ. *Instrucciones de Operación de Emergencia*. Octubre 1994.

### Bibliografía complementaria

- FREIXA, J., REVENTOS, F., PRETEL, C. *Estudio de un escenario de dilución de boro en una planta comercial*. Barcelona, Diciembre 2006.



