

DINÁMICA DEL CIRCUITO DE ALTA PRESION DE CIRCULACION NATURAL ALREDEDOR DEL PUNTO DE OPERACIÓN NOMINAL - ENSAYOS Y MODELADO CON RETRAN 02.

Masriera, N. A., Doval, A. S., Mazufri C. M.

INVAP S.E.

Resumen

El Circuito de Alta Presión de Circulación Natural (CAPCN) reproduce a escala todos los fenómenos termohidráulicos unidimensionales que ocurren en el primario del reactor CAREM-25 y resulta una herramienta muy importante en el proceso de calificación de los códigos de simulación. Esta instalación requirió el desarrollo de varias soluciones tecnológicas para llegar a la calidad de regulación y medición requeridos en dicho proceso. Este desarrollo experimental y de ingeniería permitió completar una fase de ensayos dinámicos durante el año 1998.

A partir del relevamiento de los datos obtenidos en el CAPCN se sistematizaron las tendencias en términos de desviaciones en las variables principales ante diferentes perturbaciones. En función de dicho análisis se estableció un grupo de ocho transitorios que constituyen un Conjunto Mínimo Representativo (CMR) de ensayos dinámicos tal que permite evaluar todos los fenómenos dinámicos.

Cada uno de estos transitorios fue simulado con RETRAN 02, empleando una planilla de cálculo para facilitar la elaboración y modificación consistente de archivos de entrada representando transitorios específicos del CAPCN.

Como resultado de la comparación entre mediciones y simulaciones computacionales, se puede concluir en que es posible reproducir la respuesta dinámica de todos estos transitorios con un nivel de aproximación relativamente homogéneo y en general aceptable, y que pueden discriminarse cuales son los modelos físicos detallados que ajustan mejor a los fenómenos, y cuales limitaciones del código RETRAN resultan con mayor peso.

NATURAL CIRCULATION HIGH PRESSURE LOOP DYNAMICS AROUND OPERATING POINT, TESTS AND MODELLING WITH RETRAN 02

Abstract

The Natural Circulation High Pressure Loop (CAPCN) reproduces in scale all the one-dimensional thermal-hydraulic phenomena occurring in the primary loop of CAREM-25 reactor. It plays an important role in the qualification process of calculating computer codes. This facility demanded to develop several technological solutions in order to achieve the measuring and control quality required by that process. This engineering and experimental development allowed completing the first stage of dynamic tests during 1998.

The trends of recorded data were systematically evaluated in terms of the deviations of main variables in response to different perturbations. By this analysis a

group of eight transients was selected, providing a Minimum Representative Set (MRS) of dynamic tests, allowing the evaluation of all dynamic phenomena.

Each of these transients was simulated with RETRAN-02, using a spreadsheet to facilitate the consistent elaboration and modification of input files.

Comparing measured data and computer simulations, it may be concluded that it is possible to reproduce the dynamic response of all the transients with a level of approximation quite homogeneous and generally acceptable. It is possible to identify the detailed physical models that fit better the dynamic phenomena, and which of the limitations of RETRAN code are more relevant.

1 PLANTEO GLOBAL

La aproximación a la Dinámica de la Planta CAREM requiere un esfuerzo inicial en conocer el conjunto de fenómenos que ocurren en la parte de la Planta que concentra las principales características innovadoras: el **primario en circulación natural con autopresurización** a través de la potencia del reactor. Esta dinámica es, a priori, muy compleja por el acoplamiento entre las variables: la fuerza impulsora de la circulación, densidades, presión, potencia, título de vapor en la rama caliente, caudal, aporte de vapor al domo, etc.

Los fenómenos que participan pueden ser, en general, representados por modelos (a escala o simulados) unidimensionales. La influencia de los volúmenes tipo plenum sobre la dinámica puede aproximarse razonablemente en modelos unidimensionales en la medida en que no haya cambios de densidad muy grandes. Por lo tanto, el único fenómeno esencialmente tridimensional (que queda fuera de planteos unidimensionales) es el escurrimiento bifásico en la chimenea. La influencia de este fenómeno sobre la dinámica global se ha acotado por medios analíticos (cuya descripción excede el alcance de este trabajo) por lo que el esfuerzo se ha concentrado en modelos unidimensionales.

Se diseñó una instalación ad-hoc, el CAPCN (Circuito de Alta Presión de Circulación Natural), LET (Laboratorio de Ensayos Termohidráulicos), Pilca IV, y se avanzó en la ejecución de un Plan de Ensayos, con el objeto de calificar el código (RETRAN) utilizado para modelar dinámicamente la planta. El circuito, los ensayos y el procesamiento global de datos se describen en la sección 2.

De dicho procesamiento se obtuvo un grupo de ocho transitorios que constituyen un Conjunto Mínimo Representativo (CMR) de ensayos dinámicos tal que permite evaluar todos los fenómenos dinámicos alrededor del punto nominal de operación. Los ensayos de CMR están numerados de 1 a 8 y permiten formar dos subconjuntos:

- Los transitorios 1 a 5 tienen prácticamente el mismo estado inicial con cinco perturbaciones (venteo, pulso de potencia ascendente y descendente, pulso de caudal de secundario ascendente y descendente).
- Los transitorios 6 a 8 tienen prácticamente la misma perturbación con cuatro condiciones iniciales diferentes (nominal, volumen del domo reducido, resistencia hidráulica reducida y con presión parcial nitrógeno).

2 ENSAYOS EN EL CAPCN

2.1 DESCRIPCIÓN DEL CAPCN

El principal objetivo del Circuito de Alta Presión de Circulación Natural (CAPCN) es permitir estudiar la respuesta dinámica del circuito primario, que al ser autopresurizado presenta un acoplamiento entre las variables: la fuerza impulsora de la circulación, densidades, presión, potencia, título de vapor en la rama caliente, caudal, aporte de vapor al domo, etc.

El circuito primario del CAPCN (figura 1) apunta a reproducir una vena fluida del primario del CAREM. Las magnitudes intensivas (como temperaturas, velocidades, flujos calóricos o presión) se reproducen exactamente, mientras que las magnitudes extensivas (como potencia o caudal) se reproducen a escala.

La mayor parte del primario del CAPCN está formado por cañerías de 3" de diámetro, por lo tanto quedan fuera de posibilidad la reproducción de los fenómenos tridimensionales que puedan aparecer en el primario del CAREM. El resto del primario del CAPCN está constituido por el plenum inferior (12" de diámetro) y el componente denominado "GV" que estrictamente abarca el domo, plenum superior, el Generador de Vapor y ambas ramas a esa altura.

El circuito primario se puede operar en régimen de sobrepresión y con diferentes pérdidas de carga entre la rama caliente y la rama fría. La potencia térmica se puede regular tanto de forma manual como por un lazo de realimentación con la presión primaria como variable a mantener.

El Generador de Vapor es helicoidal de dos serpentines, reproduciendo en su zona activa el diámetro y longitud de cada serpentín del GV del CAREM.

El circuito secundario si bien no tiene semejanzas con el secundario de planta CAREM provee las condiciones de borde del Generador de Vapor en términos de las magnitudes intensivas (presiones, velocidades, temperaturas).

Ambos circuitos cuentan con instrumentación para medición de presiones, niveles, temperaturas y caudales, y con sistemas auxiliares para inyección y extracción de agua y presurización con nitrógeno.

El control de los actuadores, la adquisición de los datos y la operación se realizan de manera remota desde la sala de control a través de una red de PC's que posee un software multinodal que es una aplicación del código INTRIX.

El software de control es suficientemente flexible como para programar "a medida" la adquisición de datos, definir lazos de realimentación, operar de manera automática secuencias estándar y programar funciones forzantes sobre los actuadores.

En la figura 2 se muestra una vista general de la planta.

2.2 PLAN DE ENSAYOS

El análisis del comportamiento dinámico del CAPCN implica relevar la respuesta ante distintas perturbaciones aplicadas al sistema (potencia térmica, remoción de calor y venteo), y considerando distintos estados estacionarios iniciales de los parámetros de ingeniería (volumen del domo o nivel del primario, resistencia hidráulica, temperatura de entrada del secundario, presión parcial de nitrógeno, etc.). Tal relevamiento se ha acotado de acuerdo a los siguientes criterios:

- Los estados iniciales del CAPCN de interés son los análogos a estados operativos del CAREM durante procedimientos de Puesta en Marcha o en modos de potencia.
- Para el estado de Operación a Potencia Normal o “nominal” es de interés relevar la influencia de parámetros de ingeniería sobre la respuesta del sistema ante distintas perturbaciones. Esto es porque la extrapolación de resultados del CAPCN al CAREM no es directa (sino a través de modelos computacionales) y por lo tanto la reproducción de esos parámetros no puede ser exacta.
- Para estados a presiones y temperaturas menores a las nominales, el relevamiento necesario debe permitir comparar tendencias respecto al estado nominal.

A partir de estos criterios se desarrolló un Plan que incluyó las siguientes etapas:

1. Ensayos preliminares de caracterización de componentes y equipos.
2. Ensayos de balance térmico para ajuste de instrumentación y estimación de precisiones de mediciones.
3. Ensayos dinámicos alrededor del punto de operación nominal (dinámica termohidráulica pura).
4. Ensayos dinámicos a lazo de control (de potencia-presión) cerrado.
5. Ensayos dinámicos a bajas presiones y temperaturas
6. Ensayos dinámicos con medición de la fracción de vacío en la chimenea.
7. Ensayos dinámicos con simulación por software de la cinética neutrónica.

De este plan quedan como tareas a ejecutar los puntos 6. y 7., y se prevé la repetición de algunos ensayos seleccionados como realimentación a partir del procesamiento de los datos.

2.3 PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS

La imposibilidad de conseguir una aproximación simultánea de todas las características dinámicas (similitud de grupos dimensionales) involucradas en el modelado del CAREM mediante el CAPCN, hace que los resultados de los ensayos del CAPCN no sean extrapolables de manera directa a estados análogos del CAREM. La forma de extender al CAREM la evidencia experimental del CAPCN es a través de simulaciones RETRAN, más específicamente a través de los modelos de fenómenos detallados.

Los ensayos de las etapas preliminares (de caracterización), y de balance térmico dan resultados de aplicación directa sobre parámetros de modelos RETRAN, pero el uso de los resultados de ensayos dinámicos requiere un procesamiento: no es viable simular todos los transitorios de la Etapa 3, alrededor del punto nominal, para compararlos con los datos experimentales. El procesamiento necesario puede resumirse en los siguientes pasos:

1. Se graficó la evolución de las principales variables del sistema durante los transitorios. En ellos se verifican criterios de aceptabilidad sobre la calidad del estacionario inicial y proximidad a parámetros de consigna.

2. Se “midió” en cada transitorio la desviación máxima respecto al estacionario inicial de las principales variables: la presión, caudal y temperatura de rama fría del circuito primario del CAPCN.
3. Se ordenaron sistemáticamente las desviaciones según los tipos de perturbaciones y según valores de los parámetros de ingeniería. Se llevó esta información a gráficos de tendencias de los resultados obtenidos de los ensayos dinámicos.
4. Se seleccionaron los tipos de perturbaciones y parámetros de ingeniería más significativos, por sensibilidad e influencia respectivamente, buscando formar un grupo de menos de 10 transitorios que retenga la información relevante de cada etapa de ensayos.

Del procesamiento de los ensayos dinámicos de la etapa 3, (sección 2.2) se obtuvo un grupo de ocho transitorios que constituyen un Conjunto Mínimo Representativo (CMR) tal que permite evaluar todos los fenómenos dinámicos alrededor del punto nominal de operación.

De los primeros tres pasos de este procesamiento puede concluirse que la ejecución de los ensayos dinámicos realizados hasta ahora tienen, en general, una coherencia y calidad aceptable y pueden establecerse tendencias. El uso del CMR en su contraste con simulaciones se describe con mayor detalle en la sección siguiente.

En cuanto a la dinámica en sí, los resultados permiten concluir que alrededor del punto de operación nominal la circulación natural con el sistema autopresurizado es estable, aún con variaciones importantes de los parámetros de ingeniería relevantes. El sistema acepta la denominación de auto - estable en cuanto tiende a recuperar el estado inicial tras cualquier tipo de perturbación.

En cuanto a tendencias, para algunas perturbaciones la influencia de los parámetros de diseño no responde a la tendencia intuitivamente esperada tal como menores desviaciones a mayor volumen de domo y menor resistencia hidráulica.

3 MODELADO DE LOS ENSAYOS DEL CAPCN

3.1 MODELO DEL CAPCN

El trabajo de modelado se realizó en varias etapas. Tras una etapa preliminar de elaboración de modelos previos a la obtención de datos experimentales (usado para desarrollo de procedimientos de Puesta en Marcha y de operación) se dedicó esfuerzo a la elaboración de una Planilla de Cálculo EXCEL para producir el archivo de entrada RETRAN de manera automática. Este enfoque agiliza enormemente la implementación de modificaciones ulteriores, particularmente en lo que hace a:

- Manipulación de información física y geométrica redundante.
- Coherencia del conexionado de volúmenes de control, uniones entre volúmenes y superficies de intercambio de calor.
- Conversión de unidades de medida internacionales a unidades británicas.

La planilla EXCEL con que se simuló el Conjunto Mínimo Representativo de los ensayos dinámicos de 1998 incorpora al modelado las modificaciones / actualizaciones

del circuito (como el cambio del conector de corriente continua) y tiene las siguientes características:

- Tiene “flags” para habilitar o no intercambio de calor en los tramos de los serpentines previos al helicoide del GV. Se consideró esto necesario porque la totalidad de las superficies conductoras de calor del modelo no resultaron de una optimización. Tiene además un factor de ajuste de la conductividad, para mantener la aproximación de potencia transferida al cambiar el número de conductores.
- Permite modelar el disparo de cualquiera de las cinco perturbaciones posibles, fijando tiempo de inicio, magnitud y duración.
- Para que la condición de borde del secundario sea elástica con entrada de valores de temperatura y presión, se implementó como función interna de la planilla una subprograma con funciones de estado del agua.
- En todas las hojas de la planilla se identifican las celdas que son entradas de datos que el usuario puede modificar, mediante diferentes colores del fondo de la celda.
- Hay una hoja adicional con un esquema del modelo, como asistencia al usuario.

Dado el proceso físico del primario del CAPCN, autopresurizado y de circulación natural, (definidos los equipos en geometría y materiales), el sistema no permite fijar todas las variables en valores arbitrarios e independientes. En las simulaciones se adopta una metodología de obtención de estacionarios muy similar a la usada en la operación del CAPCN.

De manera simplificada, las variables que se fijan son:

- Caudal y temperatura de alimentación a los GV (lado secundario)
- Presión del primario (consigna del lazo de control).
- Inventario de agua en el primario.
- Resistencia hidráulica del primario (posición de la válvula FX_105).
- Fugas térmicas del circuito primario (y su distribución).

Mientras que las que toman valores por sí solas son:

- Caudal de primario
- Temperatura de vapor vivo
- Potencia de calefacción
- Nivel de primario
- Temperaturas del primario

Para ajustar los valores de estacionario de las variables de este último grupo pueden modificarse las del primer grupo, pero esto requiere adoptar criterios claros para no caer en iteraciones poco significativas.

Debe tenerse en cuenta que si los estacionarios del conjunto son desde el punto de vista experimental suficientemente próximos deben ser considerados el mismo en cuanto a parámetros de modelado.

Por ejemplo, aunque el caudal de primario del estacionario no es exactamente el mismo en los casos 1 a 5, las diferencias se mantienen menores al 3% (del orden del error de medición). Entonces se prefiere no cambiar el coeficiente de pérdida de carga (k) de la válvula FX_105 para distintas corridas manteniendo la misma entrada de datos (planilla). De manera similar, el fouling (ensuciamiento) de los tubos del GV se ajustó

para aproximar la temperatura de vapor vivo al grupo de ensayos de manera global (medición TT_201), en vez de modificarlo sobre casos individuales.

En general todos los modelos puntuales fueron el resultado de la elaboración “espontánea” según reglas del buen arte en el marco de las capacidades del código RETRAN. Queda sin embargo una indeterminación en cuanto a si el modelo del domo resulta globalmente en mejores resultados si se lo considera o no en equilibrio termodinámico. Se espera discriminarlo contrastando los resultados con datos experimentales.

3.2 CONTRASTE CON ENSAYOS

Se contrastan los transitorios del Conjunto Mínimo Representativo (CMR) de la etapa 3 (alrededor del punto nominal de operación) contra simulaciones RETRAN. Distintos transitorios muestran un “peso relativo” distinto de los fenómenos termohidráulicos que participan de la dinámica. Por lo tanto los datos experimentales pueden ser utilizados como herramienta para validaciones de modelos puntuales de las simulaciones computacionales.

Los ensayos de CMR están numerados de 1 a 8 y permiten formar dos subconjuntos denominados Grupo 1 y Grupo 2, y se estudian por separado.

- Grupo 1: son los transitorios 1 a 5, tienen prácticamente el mismo estado inicial con las 5 perturbaciones (venteo, pulso de potencia ascendente y descendente, pulso de caudal de secundario ascendente y descendente).
- Grupo 2: son los transitorios 5 a 8, tienen prácticamente la misma perturbación con 4 condiciones iniciales diferentes (nominal, volumen del domo reducido, resistencia hidráulica reducida y con presión parcial nitrógeno).

Para el análisis de esta comparación se está usando una terminología muy específica común a los informes de procesamiento de los datos experimentales del CAPCN:

- **Variables** son magnitudes medidas del proceso (p. ej. presión, temperatura, caudal).
- **Parámetros de ingeniería** son valores de variable definidas para operar en el estado estacionario (p. ej. nivel del líquido – volumen del domo, resistencia hidráulica, contenido de nitrógeno).
- **Actuaciones** son las acciones sobre los dispositivos que regulan el proceso (p. ej. operación de válvulas, regulación de calefacción o la bomba de circulación del secundario).
- **Perturbaciones** son las actuaciones específicas que se usan para sacar el sistema de su estado estacionario y producir un transitorio o “ensayo dinámico” (p. ej. pulso de potencia).
- **Desviación** es la magnitud máxima que se desplaza una variable desde su valor de estacionario tras una perturbación (p. ej. -5. bar de presión).
- **Tendencia** es la forma como se ha denominado a la influencia de un parámetro de ingeniería sobre las desviaciones.

Un conjunto típico de variables con sus valores en estado estacionario se presenta en la Tabla 1

3.2.1 TRANSITORIOS DEL GRUPO 1

La comparación se realiza en primera aproximación evaluando los gráficos en que se incluyen tanto variables experimentales como simuladas. En el Apéndice se incluyen ejemplos de gráficos de las principales variables para los transitorios **1** (venteo de vapor), **2** (aumento de caudal de alimentación) y **5** (pulso negativo de potencia).

Las cinco perturbaciones hacen que participen de manera cuantitativamente diferentes los fenómenos termohidráulicos (transferencia de calor en el GV, escurrimiento bifásico en la chimenea, autopresurización con condensación en el domo, etc.). Por lo tanto puede interpretarse que los modelos y correlaciones puntuales con que se armó el modelo RETRAN del CAPCN resultan adecuados. Queda sin embargo una indeterminación en cuanto no es posible decidir si el modelo de equilibrio termodinámico en el domo resulta globalmente en mejores resultados o no.

Yendo más allá del marco de capacidades del código RETRAN, quedan indefiniciones respecto a la conveniencia o no de representar el escurrimiento bifásico de la chimenea con un modelo de desequilibrio termodinámico entre las fases líquido y vapor.

Puede extraerse como conclusión principal que las simulaciones del Grupo 1 reproducen la respuesta dinámica de los transitorios con un nivel de aproximación relativamente homogéneo y satisfactorio.

Del análisis de los fenómenos involucrados también puede destacarse que la falta de una estimación experimental de la fracción de vacío en la chimenea es un déficit importante. De disponerse de esta variable para comparaciones, es probable que pudieran encontrarse criterios de selección de otros modelos.

3.2.2 TRANSITORIOS DEL GRUPO 2

La comparación con simulaciones computacionales del Grupo 2 del conjunto mínimo representativo de ensayos dinámicos (referencia 1) confirma que con el modelo presentado se reproduce la respuesta dinámica de todos estos transitorios con un nivel de aproximación en general satisfactorio, aunque esto resulta menos homogéneo que con el Grupo 1. En el Apéndice se incluyen ejemplos de gráficos de las principales variables para los transitorios **5** (estado inicial con resistencia hidráulica reducida) y **7**: (estado inicial con volumen del domo reducido)

Más específicamente, los modelos especificados (definidos) presentan buena capacidad de reproducir la influencia paramétrica sobre el caudal de circulación de la resistencia hidráulica, el cambio de volumen del domo y una presión parcial de no-condensable. Pero no tienen capacidad de reproducir la influencia sobre la presión del sistema.

El modelo de la simulación 8 (ensayo con nitrógeno en el domo) no resulta en una buena aproximación global. Esto es esperable porque el modelo de gas no-condensable de RETRAN está desarrollado para simulaciones de contención, no para acumuladores de presión (y el domo del CAPCN es más similar a esto último).

Respecto a la indeterminación en el modelado del domo, este segundo grupo no ayuda a decidir si el modelo de no-equilibrio termodinámico resulta en mejores resultados.

4 CONCLUSIONES

El avance actual en los ensayos realizados en el CAPCN ha producido información relevante sobre los fenómenos dinámicos que aparecen en un circuito en circulación natural con autopresurización. El CAPCN es una instalación ad-hoc, parte de un conjunto de desarrollos orientados a estudiar la Dinámica del primario del Reactor CAREM.

Respecto al objetivo puntual de calificar el código de planta (RETRAN) utilizado para modelar dinámicamente la planta, éste se ha llevado adelante en un rango acotado de regímenes de funcionamiento alrededor de su punto de operación nominal.

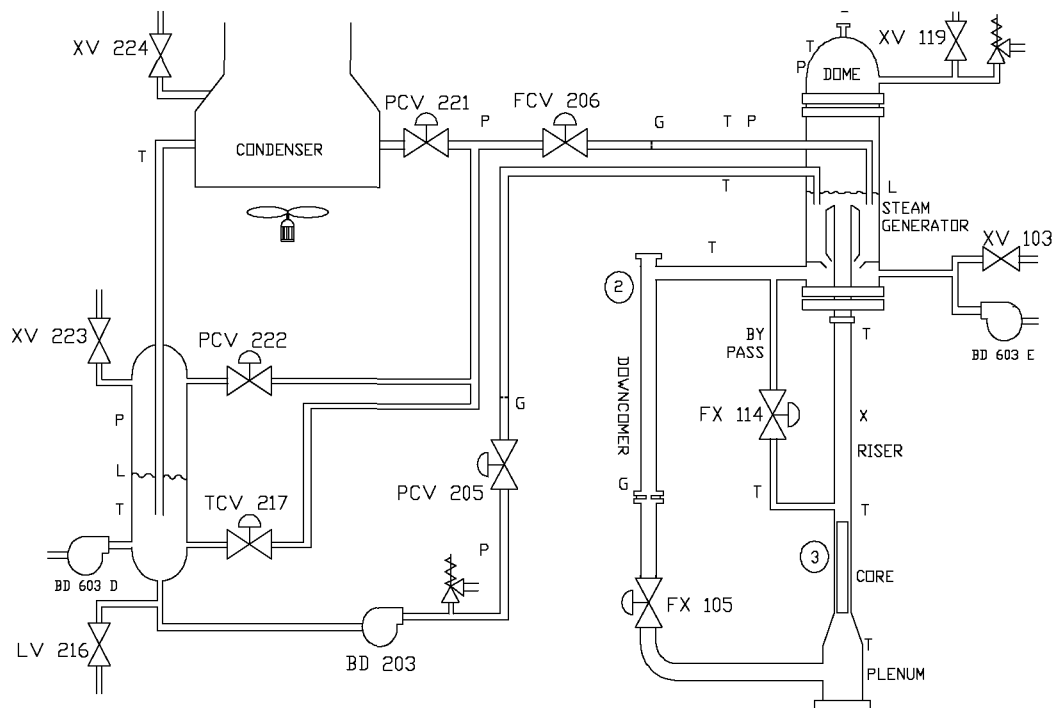
Para los ensayos en este rango, del procesamiento de datos se obtuvo un grupo de ocho transitorios que constituyen un Conjunto Mínimo Representativo (CMR) de ensayos dinámicos tal que permite evaluar todos los fenómenos dinámicos alrededor del punto nominal de operación.

La comparación con simulaciones computacionales muestra que con el modelo presentado se reproduce la respuesta dinámica de todos estos transitorios con un nivel de aproximación, en general, satisfactorio. El criterio de aceptación para definir las aproximaciones como satisfactorias está dado por la reproducción, en primer orden, de los tiempos característicos y magnitud de las desviaciones máximas en las principales variables tras las perturbaciones.

El nivel de ajuste alcanzado con este primer modelo RETRAN no llega a la capacidad de reproducir aceptablemente las tendencias ante cambios del volumen del domo y la resistencia hidráulica, por lo que aún no se estaría en condiciones de usar modelos análogos para estudiar la influencia de estos parámetros de ingeniería en el CAREM.

Debe también concluirse que la falta de una estimación experimental de la fracción de vacío en la chimenea es un déficit importante. De disponerse de mediciones de esta variable, es probable que pudieran encontrarse criterios de selección de otros modelos. Similarmente se confirma que quedan indefiniciones respecto a la conveniencia o no de representar el escurrimiento bifásico de la chimenea y el domo con un modelo de desequilibrio termodinámico entre las fases líquido y vapor. El análisis de este punto no puede evaluarse con el código RETRAN.

5 TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS DE LAS SIMULACIONES



Nota: Medidor de (P) presión, (T) temperatura, (G) caudal y (L) nivel. Válvulas (CV) regulables en área, (XV) on-off y (BD) bombas

Figura 1 Diagrama de proceso del CAPCN

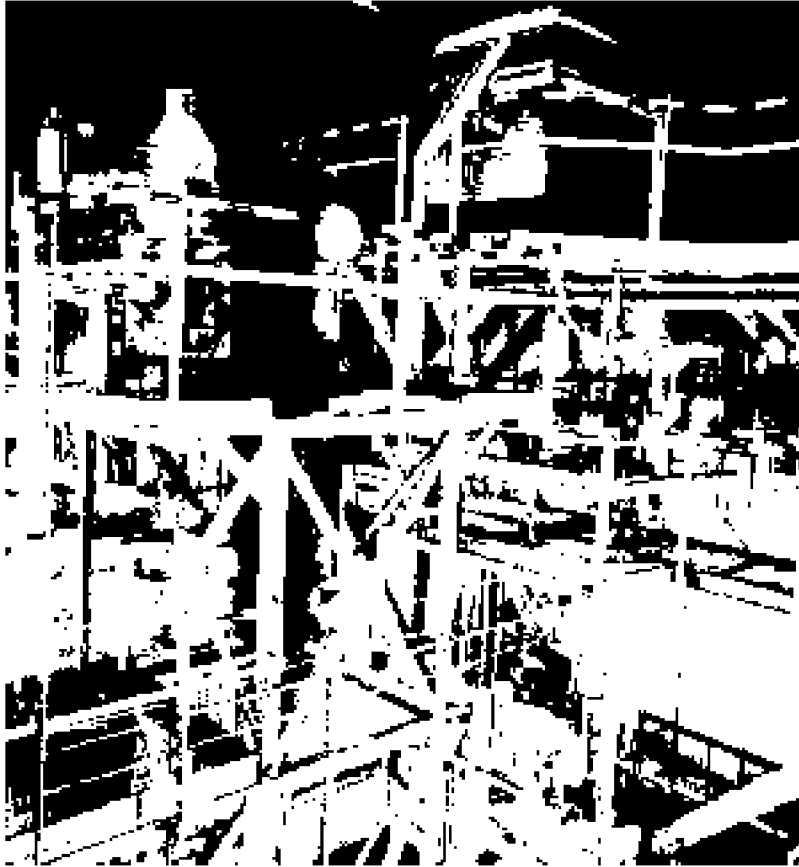
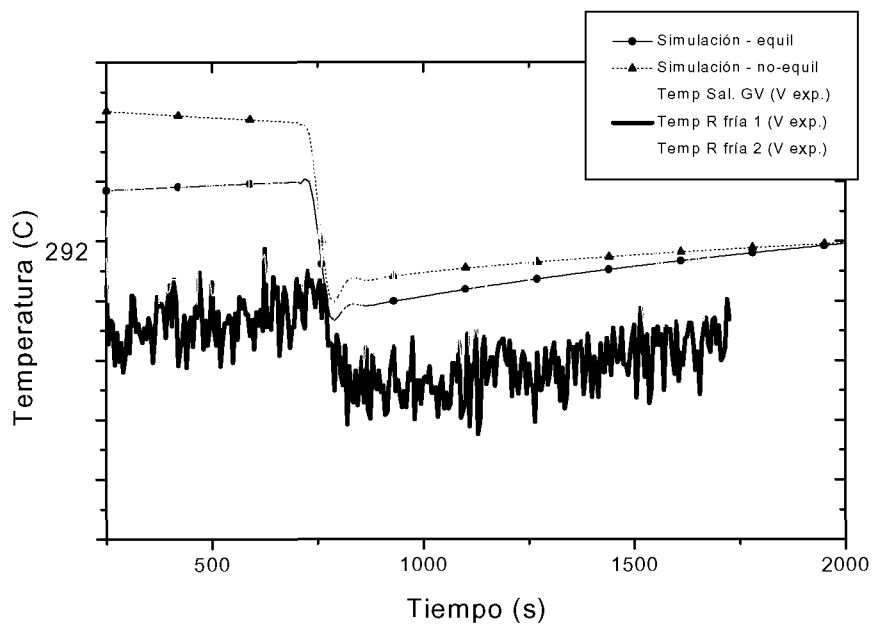
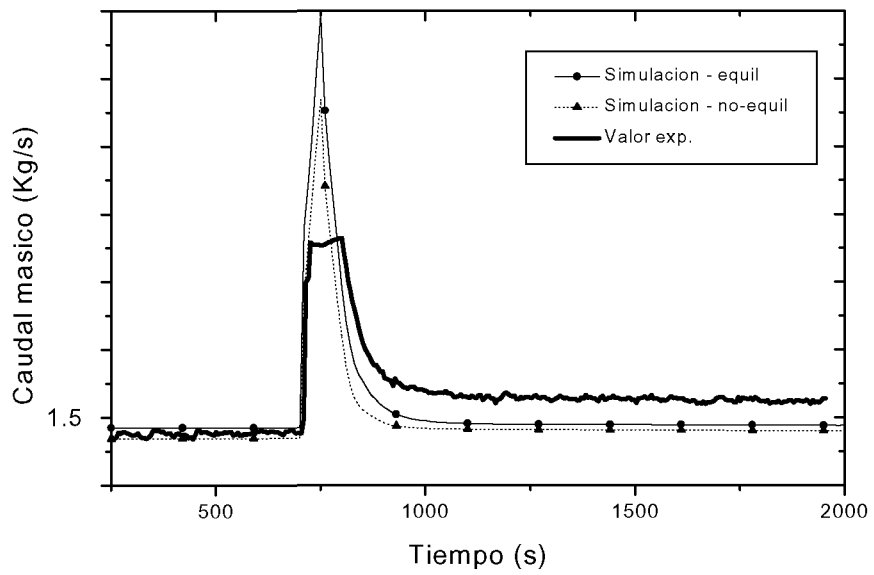
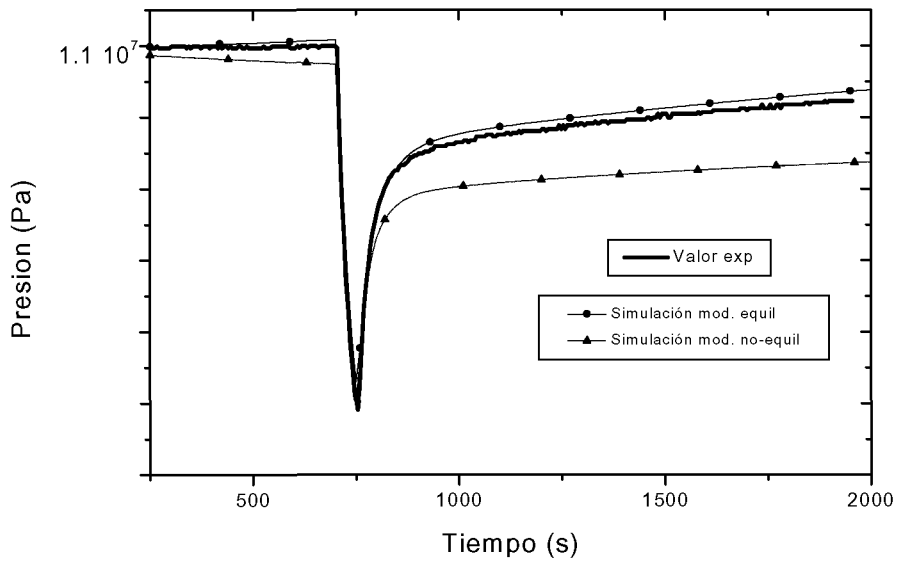


Figura 2 Vista general del CAPCN

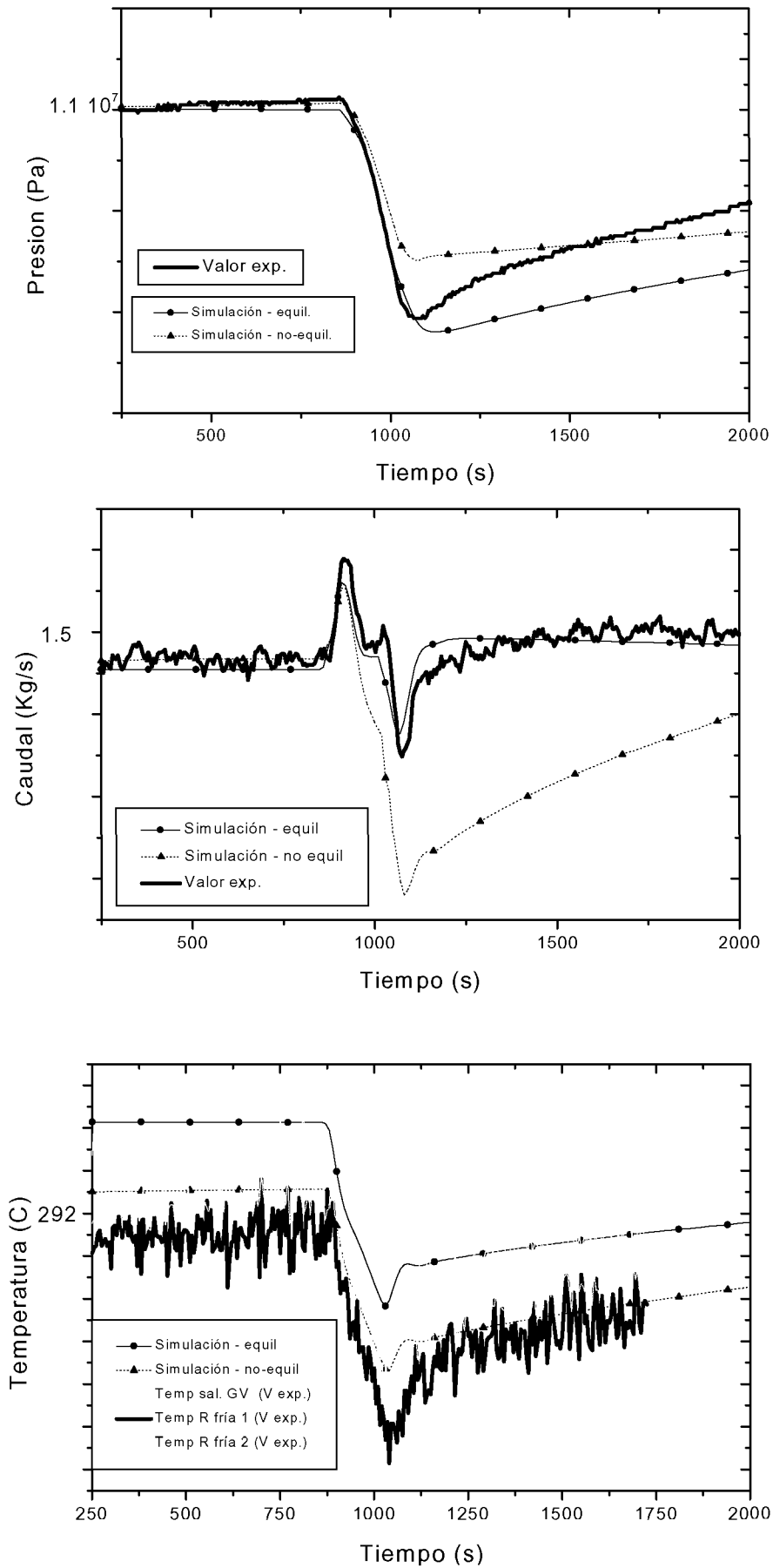
Tabla 1: Estado estacionario típico

Variable	
Caudal en el circuito primario	1.49 Kg/s
Caudal en el circuito secundario	0.105 Kg/s
Presión en el domo	110 bar
Temperatura de la rama fría – circuito primario	288 °C
Temperatura de alimentación al generador de vapor – lado secundario	209.°C

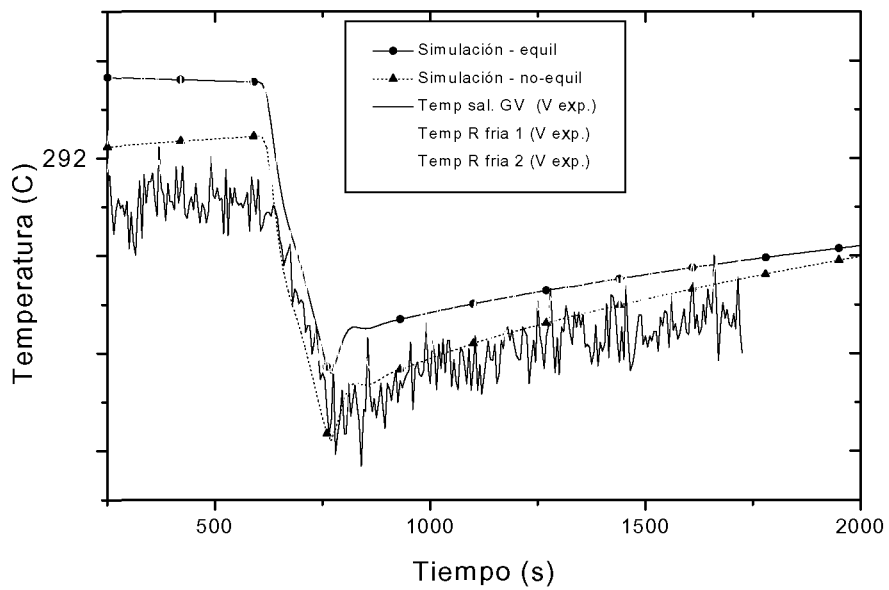
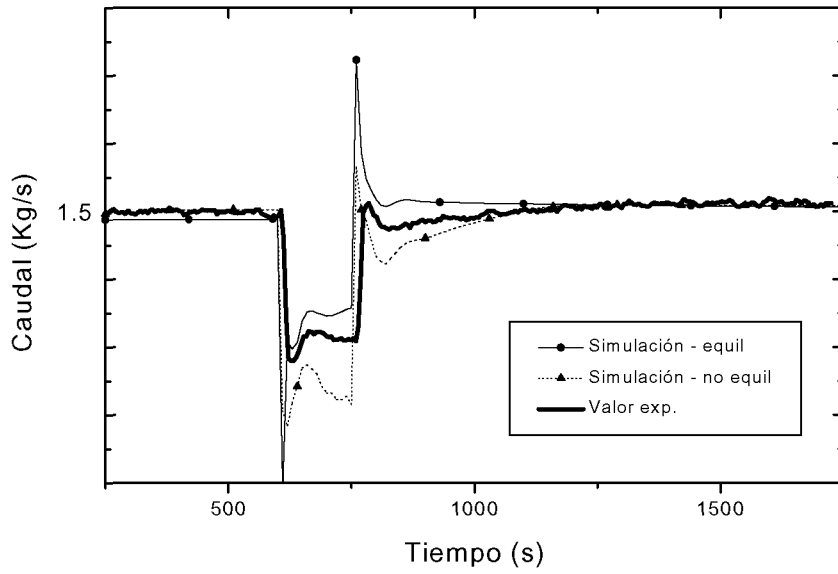
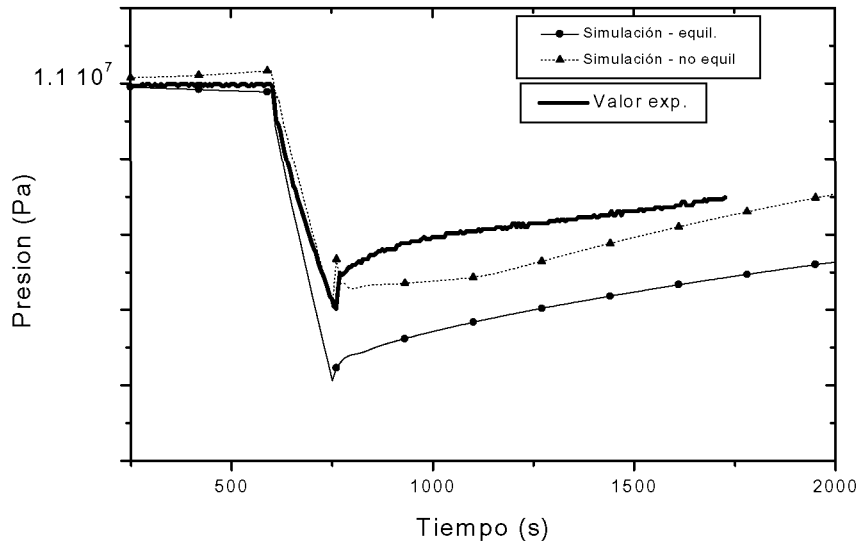
SIMULACION 1: Venteo de vapor



SIMULACION 2: Aumento de caudal de alimentación



SIMULACION 5: Pulso negativo de potencia



SIMULACION 7: Estado inicial con volumen del domo reducido

