

USO DEL MODELO DE LA CENTRAL NUCLEAR EMBALSE CON RELAP5: COMPARACION CON RESULTADOS DE LA PUESTA EN MARCHA PARA UN DISPARO DE TURBINA AL 80% DE PLENA POTENCIA

USE OF EMBALSE NPP MODEL IN RELAP5: COMPARISON WITH RESULTS OF A TURBINE TRIP AT 80% FULL POWER DURING COMMISSIONING

Ricardo Ugarte, Alejandro I. Lazarte y Luis M. Moreno

*Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), Av. Del Libertador 8250, CABA C1429PNB
rugarte@arn.gob.ar; alazarte@arn.gob.ar; lmoreno@arn.gob.ar*

Palabras Clave: Central Nuclear Embalse, RELAP5, Disparo de Turbina.

Resumen. En el marco de la extensión de vida de la Central Nuclear Embalse (CNE), ARN ha desarrollado un modelo termohidráulico con cinética puntual de la planta completo en RELAP5 mod. 3.3 patch4 con el fin de simular accidentes dentro de la base de diseño. Este modelo se utiliza para verificar, de manera independiente, el comportamiento de la planta en la etapa de puesta en marcha para distintos escenarios planteados en el diseño. Uno de estos escenarios corresponde al disparo manual de turbina con el reactor operando al 80%PP. Para verificar la respuesta del modelo, se efectuaron simulaciones del disparo manual de turbina para luego comparar resultados con mediciones observadas en la planta durante el mismo escenario. Se representó el cambio de estado desde el 80%PP hasta la bajada de potencia al 50%PP (estabilizada). Las evoluciones proyectadas por el modelo reproducen la progresión de los parámetros medidos por la planta y se comportan de acuerdo a lo esperado por diseño.

Keywords: Embalse Nuclear Power Plant, RELAP5, Turbine Trip.

Abstract: Within the framework of the life extension of Embalse Nuclear Power Plant (CNE), ARN has developed a thermohydraulic model with punctual kinetics of the complete plant in RELAP5 mod. 3.3 patch4 aiming to simulate accidents within the design base. This model is now being used to verify the expected behavior of the plant at the commissioning stage and independently verify that the response of the plant for different scenarios is that expected by design. One of these scenarios corresponds to the manual turbine firing with the reactor operating at 80% of full power. To verify the response of the model, the results for manual turbine trip were modeled, simulated and compared with the results observed in the plant. The objective of this comparison is to verify that the important thermohydraulic parameters of the plant and the predictions from the model are consistent. The change of state was simulated from 80% until the power drop to 50% of full power (stabilized). Comparison showed that the evolution of relevant process parameters from the model are consistent with that of the parameters measured in the plant and that these evolve as expected by design.

1. INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear Embalse (CNE), del tipo CANDU6, se encuentra finalizando la etapa de puesta en marcha luego del proceso de reacondicionamiento. Como parte de los estudios a realizar durante el proceso, se encuentran la actualización y las verificaciones del análisis de seguridad. A la solicitud de la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), el operador tuvo que realizar un conjunto de pruebas funcionales, las cuales incluyen transitorios de potencia en distintos estados. Los datos de planta generados en estos transitorios fueron utilizados para validar el modelo de planta completamente independiente con el que cuenta la ARN.

Para el desarrollo de esta tarea se utilizó el código de sistemas RELAP5 mod3.3 patch 4, distribuido por la Comisión Regulatoria Nuclear de los Estados Unidos (US-NRC) y de la interfaz gráfica SNAP2.5.8 (también distribuida por la US-NRC). El código de cálculo RELAP5 es utilizado muy ampliamente en la industria nuclear, tanto por reguladores como por diseñadores, por lo que existe una gran experiencia de uso y de validación del mismo ([Fletcher et al. 2010](#)).

El objetivo principal de este desarrollo es generar conocimiento sobre el comportamiento de la CNE frente a distintos eventos y proveer una herramienta para realizar cálculos independientes a los del diseñador y operador de la CNE. El modelo validado puede ser utilizado para proveer información del comportamiento de la planta sobre diversos eventos postulados.

En este marco, el presente trabajo analiza un disparo manual de turbina al 80%PP. Este escenario, conduce a que el vapor sea desviado al condensador en vez de ir a la turbina, y se dé un escalonamiento hacia una potencia menor. El evento se caracteriza por una rápida despresurización del sistema primario de transporte de calor (SPTC) y la llegada a un nuevo estado estacionario al 50% de potencia.

El objetivo de este trabajo es validar el comportamiento de la planta según el diseño para este escenario.

2. MODELO DE LA CENTRAL NUCLEAR

La CNE, tendrá luego de la extensión de vida, una potencia térmica de 2064 MW en condiciones nominales y una presión de 100 bar. El núcleo consiste en 380 canales con elementos combustibles dispuestos horizontalmente. El SPTC tiene dos circuitos cerrados de refrigeración en forma de “8”. Estos circuitos, si bien son independientes, se encuentran interconectados en varias ubicaciones. Una descripción extensa del funcionamiento y de los componentes de un CANDU6 puede encontrarse en (<https://canteach.candu.org>).

El SPTC contiene las cañerías de transporte del refrigerante, cuatro generadores de vapor verticales (GVs), cuatro bombas principales, cuatro colectores de entrada y cuatro colectores de salida. Entre las ramas calientes de cada circuito se encuentran dos líneas de interconexión o de “by-pass” cuyo objetivo es mantener la estabilidad en el SPTC. Un esquema del SPTC se muestra en la Figura 1. La temperatura de entrada al núcleo oscila entre 260°C y 267 °C y egresa a aproximadamente 309°C, como una mezcla bifásica con un contenido bajo de vapor. El caudal de circulación por lazo es ligeramente superior a 2100 kg/s.

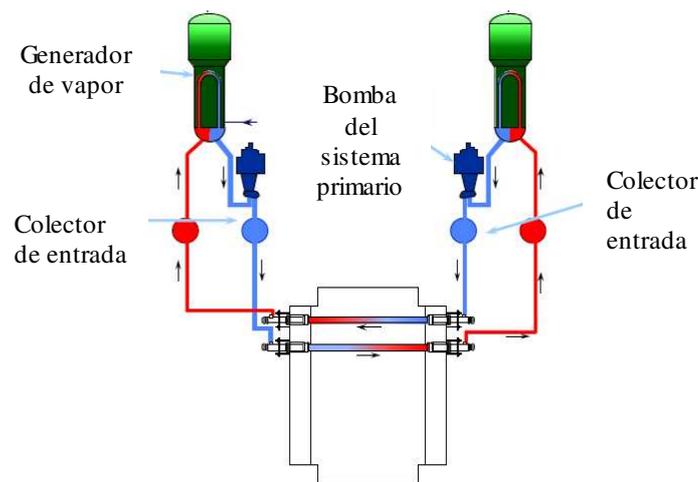


Figura 1: Esquema un circuito de refrigeración del SPTC de un CANDU6.

En cada uno de los canales o tubos de presión se encuentra el combustible, el refrigerante entra y sale por tubos de alimentación (denominados “feeders”) que llevan o toman el refrigerante desde o hacia un colector. Adicionalmente, en el SPTC existen conexiones con el sistema de control de presión, el sistema de purificación, el sistema de control de inventario (F&B), el sistema de enfriamiento de emergencia del núcleo (ECCS) y el sistema de refrigeración de parada (SEP). A continuación, se describe resumidamente la implementación de cada uno de estos sistemas, los detalles del modelo pueden ser encontrados en ([Lazarte et al. 2015](#)).

2.1. Sistema primario de transporte de calor

La Figura 2 muestra un esquema del modelo en RELAP5 del SPTC. Las cuatro bombas principales fueron modeladas usando bombas tipo “Bingham”. El sistema de control de presión consiste en el presurizador con los correspondientes calefactores, el tanque desgasificador con las válvulas de alivio de vapor y las válvulas de descarga de alivio líquido del SPTC hacia el desgasificador.

El núcleo de la CNE se modeló en 5 zonas hidráulicas equivalentes por circuito y cada zona corresponde a dos canales promedios, dando un total de 20 canales (Ver [Lazarte et al. 2015](#)).

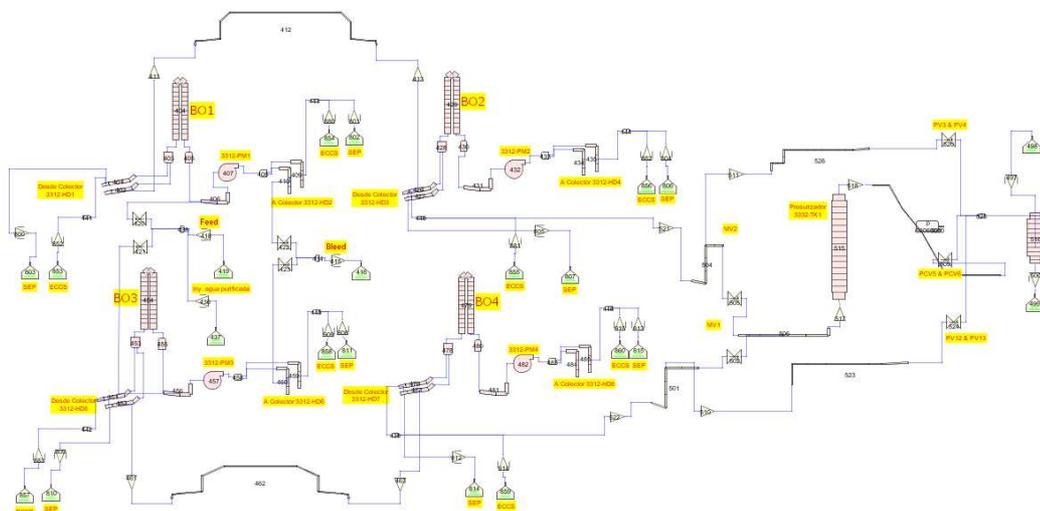


Figura 2: Esquema de la nodalización del SPTC del modelo de la CNE.

2.2. Sistema secundario

El modelo contiene gran parte del sistema secundario de planta, aunque se han realizado un conjunto de simplificaciones en algunos componentes. Este sistema consiste en: las líneas de agua de alimentación (incluyendo bombas de alimentación principal y auxiliar), GVs, líneas de vapor vivo, válvulas reguladoras de nivel de los GVs, válvulas de admisión al condensador (CSDV) y válvulas de admisión a turbina (TGV). También se cuenta con válvulas de seguridad (MSSV) y las válvulas de alivio a la atmósfera (ASDV). La turbina, el normal y de emergencia y el condensador son asumidos como condiciones de contorno.

El ingreso del agua de alimentación a los GVs se produce mediante un conjunto de válvulas reguladoras por cada línea de alimentación. Un esquema de una de las cuatro líneas del sistema de agua de alimentación y vapor incluidos en el modelo de planta se muestra en la Figura 3:

La lógica de control de nivel de los GVs se realizó siguiendo los pasos que se ejecutan en la computadora de procesos para establecer cuál debe ser la posición del vástago de la válvula de regulación.

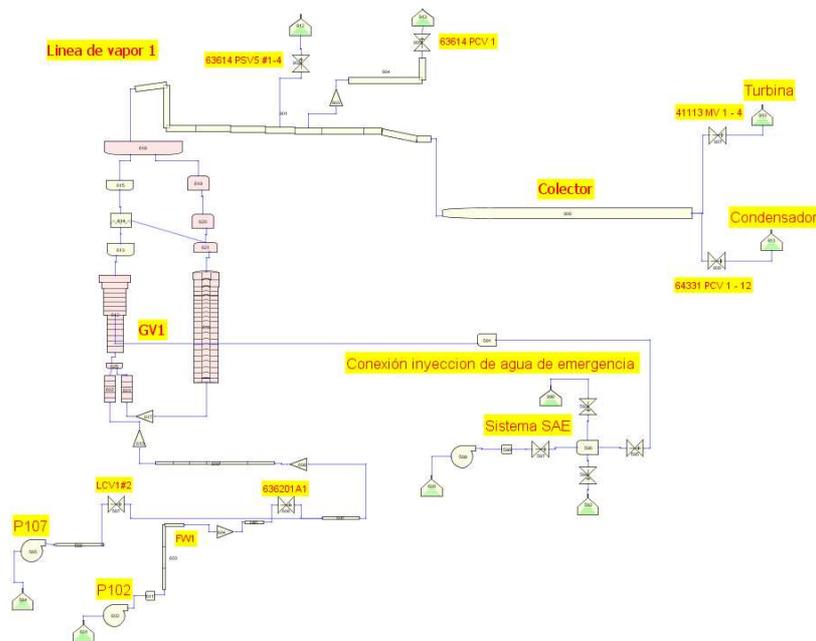


Figura 3: Circuito secundario: una línea de agua de alimentación, GVs, y la correspondiente de vapor.

3. SIMULACIÓN DEL TRIP DE TURBINA

Para realizar la simulación se utilizó el dato de la evolución de la potencia monitoreada por la planta. Se asumió que en la evolución de la potencia se encuentra embebida la información de la respuesta neutrónica de la planta y se accionó el cierre de la válvula de descarga a turbina en el mismo instante en que ocurrió en la planta. La Figura 4 muestra esquemáticamente la posición de las válvulas en el sistema secundario correspondiente al modelo.

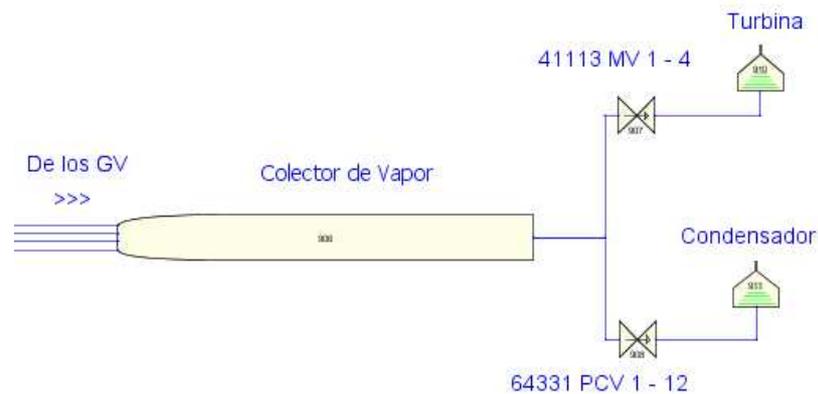


Figura 4: Esquema de la conmutación de válvulas turbina condensador.

En el momento en que ocurre el disparo de turbina se produce en forma simultánea el cierre de las válvulas 41113 y la apertura de las válvulas de admisión al condensador 64331. Esto ocurre como acción del control de planta.

Al reducirse el caudal de vapor, las extracciones usadas en el precalentado del agua de alimentación disminuyen, por lo que la temperatura del agua de alimentación decrece durante el evento. Esto se verifica en las mediciones de planta. De este modo se asume una condición de contorno utilizada en el modelo de la temperatura de agua de alimentación, idéntica a los datos tomados en la planta durante el transitorio.

Entre las hipótesis generales del modelo se considera un reactor con núcleo envejecido (4015 DPP) y no se da crédito al modelo del sistema de regulación de potencia del reactor (RRS) ya que esta información está embebida en la evolución de la potencia.

Se listan a continuación las condiciones iniciales y de contorno implementadas en el modelo para este evento:

- Se considera la inercia térmica de las cañerías y componentes más importantes del Sistema primario y del sistema secundario.
- La potencia inicial del transitorio es 80% PP.
- De abrirse las válvulas MSSV, fallan al ser demandadas 8 de las 16. (Esta es una aplicación de un criterio conservativo)
- Se le da crédito al “stepback”
- Se toman como condiciones de borde la temperatura de agua de alimentación (mediciones de planta) y un valor de presión constante en el condensador.

3.1. Estado estacionario y modelado del disparo manual de turbina

La simulación y evolución de la planta ante un evento determinado, depende de las condiciones iniciales de planta en el instante en que se produce la falla. Por lo tanto, la primer parte de la evolución de la planta (en el análisis) corresponde a la planta en estado estacionario, donde se verifican en todos los casos (en los primeros instantes de la simulación) los valores de los parámetros de planta relevantes y las condiciones iniciales con una simulación del estado estacionario del modelo. Los apartamientos entre ambos valores, son analizados.

4. EVOLUCIÓN DEL TRANSITORIO

Aquí se describe la evolución del evento y los fenómenos más relevantes para un disparo manual de turbina. Luego de ocurrido el disparo de turbina, se produce una disminución

escalonada de la potencia, el valor de referencia del reactor es controlado directamente por medio de la señal de reducción, y se pasa al modo alternativo. El aspecto más destacado del evento es la acción del sistema de control de planta para bajar la potencia desde el 80% al 50%, conmutando la descarga de vapor vivo desde la turbina hacia el sistema condensador. Para la comparación de resultados entre los datos de planta y los resultados obtenidos en la simulación, se estudió la evolución de la presión y la temperatura en el SPTC, niveles de los GV, el nivel del Presurizador, Presiones en los GV y la apertura de las válvulas de descarga a condensador. El análisis de la presión y la temperatura del SPTC se realizó en el HDR1. El análisis de los parámetros involucrados con el sistema secundario se realizó sobre el GV1. Estos datos se muestran en la Tabla 1.

Parámetro	Est. Estac. 80% PP		Est. Estac 50% PP	
	Medición Planta	Estimación Modelo	Medición Planta	Estimación Modelo
Presión Inlet Header [kg/cm ²]	114,5	114,5	113,3	113,0
Presión Outlet Header [kg/cm ²]	100,9	101,3	99,7	99,7
Nivel del Presurizador [m]	6,6	6,5	5,2	5,4
Presión en los GV [kg/cm ²]	47,0	46,9	46,6	46,8
Nivel de los GV [mm]	933	866	488	25
Apertura de válvulas de By-Pass al condensador [%]	0,0	0,0	42,2	32,5

Tabla 1: Características principales del evento sobre los distintos sistemas.

En términos generales, un disparo de turbina corresponde al cierre de las válvulas de gobierno el cual lleva al accionamiento del “Step back” (un salto de potencia hacia una potencia menor) realizado por el sistema de control de la planta. Se espera que la planta luego de esta acción, pase a un estado de potencia menor y se mantenga en este estado en forma estable. Esto refleja la capacidad de la planta para el control de la potencia.

La Figura 5 muestra la evolución de la potencia, extraída de los datos de planta para realizar el análisis. En esta figura se presenta la potencia neutrónica en función del tiempo. La potencia utilizada para el análisis fue la potencia lineal, la cual contiene variabilidades temporales de mayor rapidez, comparables con la velocidad de variación de los parámetros del SPTC.

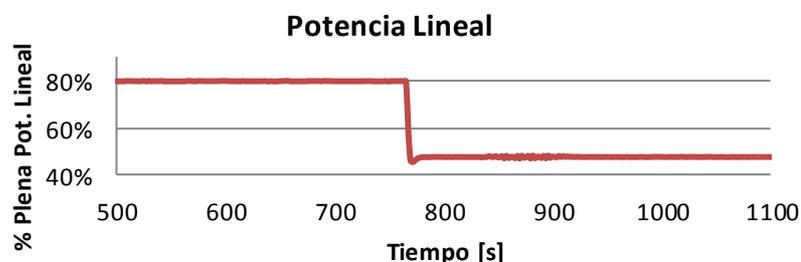


Figura 5 Determinaciones de Potencia lineal por parte de planta

En el momento en que se produce el disparo de turbina, el sistema de control de planta acciona el salto de potencia desde el 80%PP hacia el 50%PP mediante el “step-back”. Como consecuencia de la bajada de potencia, el sistema de control del sistema secundario produce la

descarga de vapor al condensador, el cual despresuriza el GV produciendo un enfriamiento rápido del sistema primario. De esta manera la presión en el SPTC baja y lo hace a la misma velocidad que baja la potencia térmica.

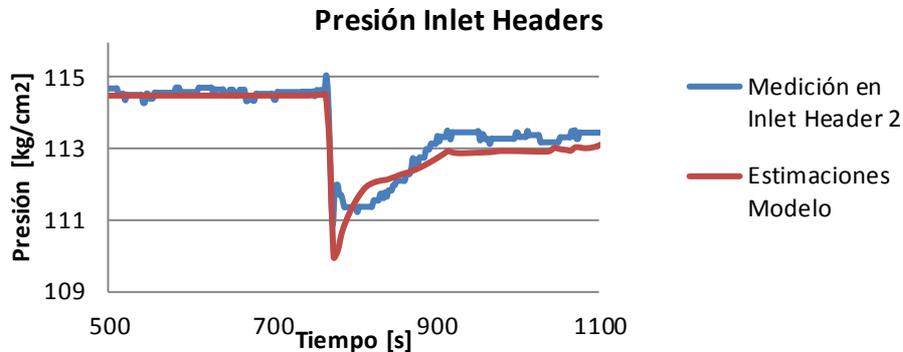


Figura 6. Evolución de la Presión en los Colectores de Entrada del SPTC.

Las diferencias en el transitorio se atribuyen a las simplificaciones realizadas en los controles de presión y del nivel del generador de vapor y a la presión constante en el condensador asumida como condición de borde en esta simulación.

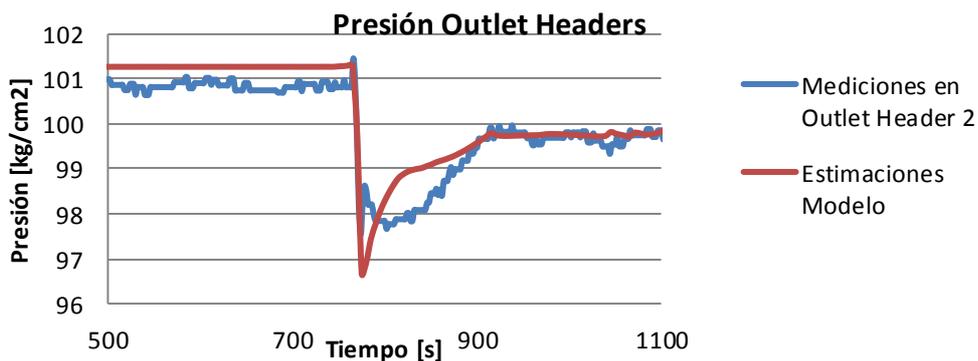


Figura 7. Evolución de la Presión en Colectores de Salida del SPTC.

Aun después de la bajada de potencia, la presión aumenta como consecuencia de la energía generada por los productos de fisión, (Figura 6 y Figura 7) haciendo que la presión suba nuevamente hasta alcanzar un valor de equilibrio como consecuencia de la acción del control de presión a través del presurizador, según se muestra en la Figura 8.

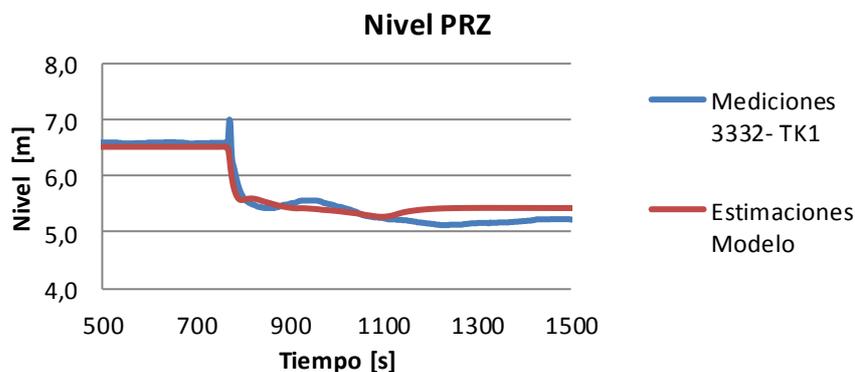


Figura 8. Evolución del Nivel en el Tanque del Presurizador.

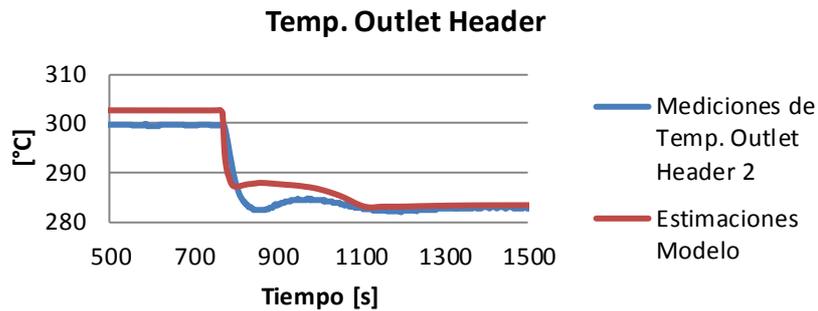


Figura 9. Evolución de la temperatura en los colectores de salida del SPTC.

En la Figura 9 se observa la evolución de la temperatura del SPTC correspondiente a un colector de salida. En el resto de los colectores el comportamiento es similar. Al producirse la bajada de potencia y la extracción de calor repentina del sistema secundario, hace que la temperatura del SPTC baje al ritmo de la presión.

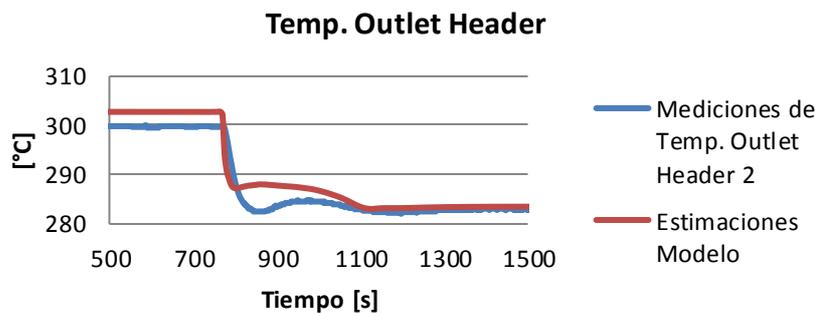


Figura 9. Evolución de la temperatura en los colectores de salida del SPTC.

Finalmente se muestra la evolución del nivel del GV. La primera parte (entre 0 y 700 seg.) corresponde al estado estacionario antes de producirse el disparo manual de turbina. Luego el nivel baja como consecuencia de la despresurización del GV al producirse la conmutación de la descarga de vapor desde la Turbina hacia el condensador.

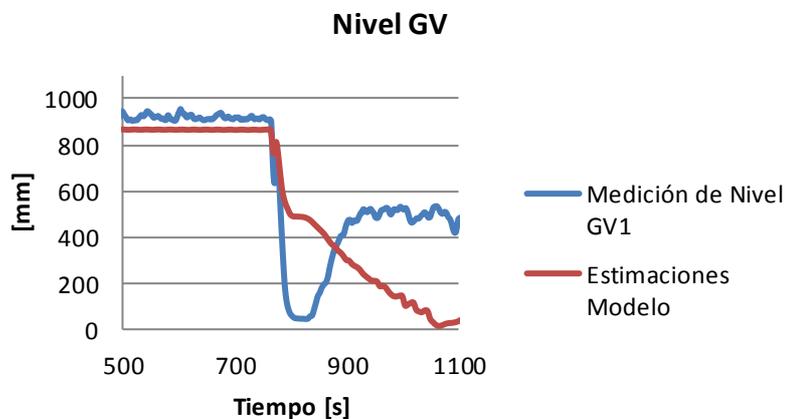


Figura 10. Evolución del Nivel de los Generadores de Vapor.

En los primeros instantes (Figura 10) la predicción del modelo es similar pero luego se aleja del valor de planta. Esta diferencia se justifica en que para el modelo se utilizó una condición de contorno de presión constante de 1×10^5 Pa para el condensador, mientras que en la planta la presión del condensador varía a medida que va perdiendo vacío.

La Figura 11 muestra el comportamiento predicho por el modelo de las válvulas de descarga a turbina y la de descarga al condensador en el momento del disparo de turbina. En la Figura 12 se muestra la comparación de la apertura de la válvula de descarga al condensador contra los datos de planta.

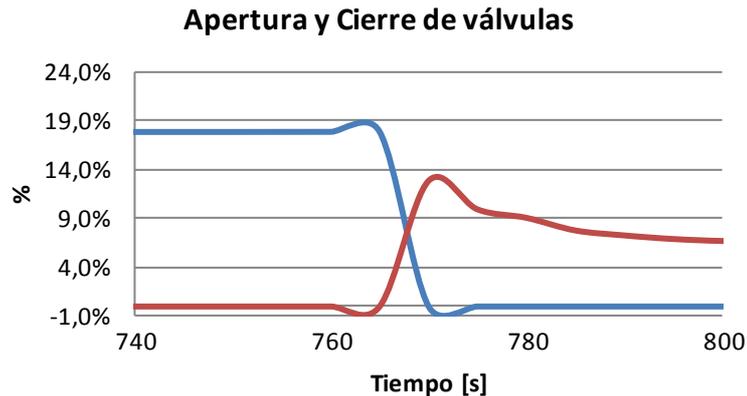


Figura 11 Conmutación de la descarga de vapor desde turbina (en azul) hacia el condensador (en rojo) observada en la corrida de simulación.

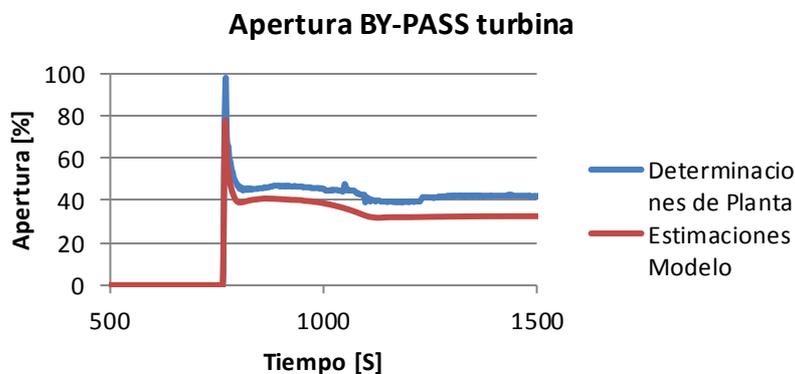


Figura 12. Evolución de la apertura de las Válvulas de descarga al condensador.

5. CONCLUSIONES

Se presentó el desarrollo, estudio y resultados de un evento de disparo de turbina manual de la CNE. Se realizó una validación con resultados de planta suministrados por NA-SA, manifestando que los valores de los parámetros de procesos analizados, las tendencias y los tiempos característicos de la evolución son coincidentes con los valores registrados en la planta.

Los resultados obtenidos se corresponden con los datos de planta lo que demuestra que el modelo realizado por ARN tiene el alcance necesario para realizar análisis del comportamiento de la planta para un disparo manual de turbina. Los sistemas de control de potencia en conjunción con los sistemas de proceso, muestran su capacidad de mantener el núcleo refrigerado y estable durante el tiempo de análisis.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la participación del CIMEC (Centro de Investigación de Mecánica Computacional) en el desarrollo del modelo utilizado para este trabajo. También a la colaboración brindada por personal de NA-SA para proveer información adicional requerida. Y al Ing. Walter Peralta por el apoyo en el suministro de datos de planta.

6. REFERENCIAS

- Fletcher, C.D., Schultz, E., United States Nuclear Regulatory Commission, RELAP5/MOD3.3 Code manual, 1-8, by Information Services Laboratory Inc., Nuclear Safety Analysis Division, 2010.
- Naundorf, D., Yin, J., Petruzzi, A., Kovtonyuk, A., NUREG/IA-0247 International Agreement Report RELAP5 Simulation of Darlington Nuclear Generating Station Loss of Flow Event, 2011.
- Lazarte A.I., Schiliuk N., Guala M.V., Modelo de la Central Nuclear Embalse con relap5: aplicación para un disparo de turbina. Conferencia AATN 2015.
- Corzo S.F., Guala M.V., Lazarte A.I., Modelo de la central nuclear Embalse con RELAP5: Accidente de pérdida de refrigerante en la tubería de aspiración de una de sus bombas. XXIII Congreso de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF), La Plata, 2017.
- Corzo S.F., Guala M.V., Lazarte A.I., Estudio Termo-hidráulico de la pérdida del suministro eléctrico externo en la Central Nuclear Embalse utilizando RELAP5. Asociación Argentina De Tecnología Nuclear (AATN), Buenos Aires, 2017.
- Corzo S.F., Schiliuk N., Lazarte A.I., Modelo de la Central Nuclear Embalse con RELAP5: Rotura de línea de vapor dentro de la contención. Asociación Argentina De Tecnología Nuclear (AATN), Buenos Aires, 2016.