

## **Simulación del Disparo de Turbina de la Unidad 1 de la Central Nuclear Laguna Verde Empleando el Código Simulate-3K**

**Angel Alegría Avendaño**

*Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias  
Dr. Barragán 779, Col. Narvarte, Del. Benito Juárez; México, D.F., C.P. 03020  
[aalegria@cnsns.gob.mx](mailto:aalegria@cnsns.gob.mx)*

**Carlos Filio López**

*Escuela Superior de Física y Matemáticas  
Av. Instituto Politécnico Nacional Edificio 9, Unidad Profesional Adolfo López Mateos,  
Zacatenco, C.P. 07738, México, Ciudad de México  
[cfilio@esfm.ipn.mx](mailto:cfilio@esfm.ipn.mx)*

**Javier Ortiz Villafuerte**

*Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares  
Carretera México-Toluca S/N, La Marquesa, Ocoyoacac, Estado de México; C.P.52750  
[javier.ortiz@inin.gob.mx](mailto:javier.ortiz@inin.gob.mx)*

### **Resumen**

Con la finalidad de comparar los resultados obtenidos del modelo desarrollado en la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) con el código SIMULATE-3K (S3K) respecto a los reportados por la computadora de proceso de la Central (SIIP), se realizó la simulación del transitorio de Disparo de Turbina (*Turbine Trip*) ocurrido por el disparo del generador principal, la baja presión diferencial de aceite de sus sellos y el SCRAM Automático de la Unidad 1 de la Central Nuclear Laguna Verde (CNLV), a 87% de potencia nominal, durante el ciclo 16 de operación. Ya que el reactor fue llevado a parada segura debido al SCRAM, fue suficiente simular 20 segundos para observar el incremento máximo de la presión con S3K. En este trabajo se muestran y comparan los siguientes parámetros: el flujo neutrónico, la potencia térmica, la presión en el domo, el flujo a la entrada del núcleo, el flujo de vapor que sale de la vasija y el MCPR. Se comparó el flujo neutrónico de los APRM's (Average Power Range Monitor) de la Central respecto al modelo de detectores de S3K. Por último, el mínimo cociente de potencia crítica (MCPR, Minimal Critical Power Ratio) fue calculado con una correlación distinta a la del proveedor del combustible y se determinó su desviación respecto a su límite de seguridad. En conclusión, los resultados obtenidos dan muestra del estado actual del modelo para la simulación de transitorios de reactividad y las áreas de oportunidad para consolidar esta herramienta en el apoyo del proceso de licenciamiento de recargas de combustible en la CNSNS.

## 1. INTRODUCCION

Como órgano regulador, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) tiene a su cargo verificar que la composición del núcleo y su operación no rebasen los límites de licencia para las ocurrencias operacionales anticipadas (AOOs, Anticipated Operational Occurrences), y por ello la importancia de contar con herramientas de cálculo independientes que permitan confirmar los resultados presentados por el licenciatarario.

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos de la simulación de un disparo de turbina con el modelo desarrollado en CNSNS de la Unidad 1 de la CNLV, empleando el código S3K. El objetivo de comparar los resultados obtenidos con el código respecto a los de la computadora de proceso de la Central (SIIP) es determinar las diferencias entre los modelos y establecer una estrategia con el desarrollador del software, a fin de que el órgano regulador cuente con una herramienta independiente, confiable y que apoye el proceso de licenciamiento de recargas de combustible.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE S3K

El código de S3K consta de modelos matemáticos y métodos numéricos necesarios para el análisis de transitorios. El modelo termo-hidráulico evalúa la entalpía y el límite cociente de potencia crítica (CPR) del canal. El modelo de sistemas periféricos incluye módulos de instrumentación para simulaciones en las cuales la respuesta de éstos es importante, tales como los análisis de accidentes de inserción de reactividad, de estabilidad, de los transitorios de presurización originados en las líneas de vapor, del inventario del refrigerante, de cambios en la temperatura del refrigerante e inestabilidades que ocurren durante un evento de disminución de temperatura [1].

### 2.1. Modelo Neutrónico del Núcleo en 3D

El modelo nuclear usado en S3K resuelve la Ecuación de Difusión 3-D dependiente del tiempo, para dos grupos de energía con retroalimentación termo-hidráulica.

La retroalimentación termo-hidráulica de las secciones eficaces nodales se calcula usando una biblioteca de parámetros neutrónicos respecto a la densidad del refrigerante, la temperatura del combustible, el tipo de barra de control, el quemado del combustible, los vacíos históricos, la historia de la barra de control y el inventario de los productos de fisión [2].

### 2.2. Modulo Termo-Hidráulico

El módulo consta de dos modelos: el modelo de conducción del pin combustible calcula la distribución de temperatura dentro del pin de combustible y la conducción de calor del combustible hacia el refrigerante. El promedio de la temperatura de combustible se usa para calcular las secciones eficaces y los cambios de entalpía del combustible; y el modelo hidráulico calcula las distribuciones del flujo, la densidad y de vacíos para el canal. El modulo termo-

hidráulico está acoplado al neutrónico mediante la razón de generación de calor del pin combustible, que la proporciona directamente la potencia neutrónica.

El modulo termo-hidráulico proporciona al modelo neutrónico la información hidráulica apropiada para permitir la retroalimentación de las secciones eficaces a condiciones térmicas locales.

### 2.3. Modelo de la Vasija

La Figura 1 muestra esquemáticamente los componentes del modelo de la vasija. La vasija se divide en componentes 1D para el plenum superior, las tuberías, los separadores, el downcomer (con dos zonas radiales no mezcladas), dos lazos de recirculación con bomba y el plenum inferior (con dos zonas radiales no mezcladas).

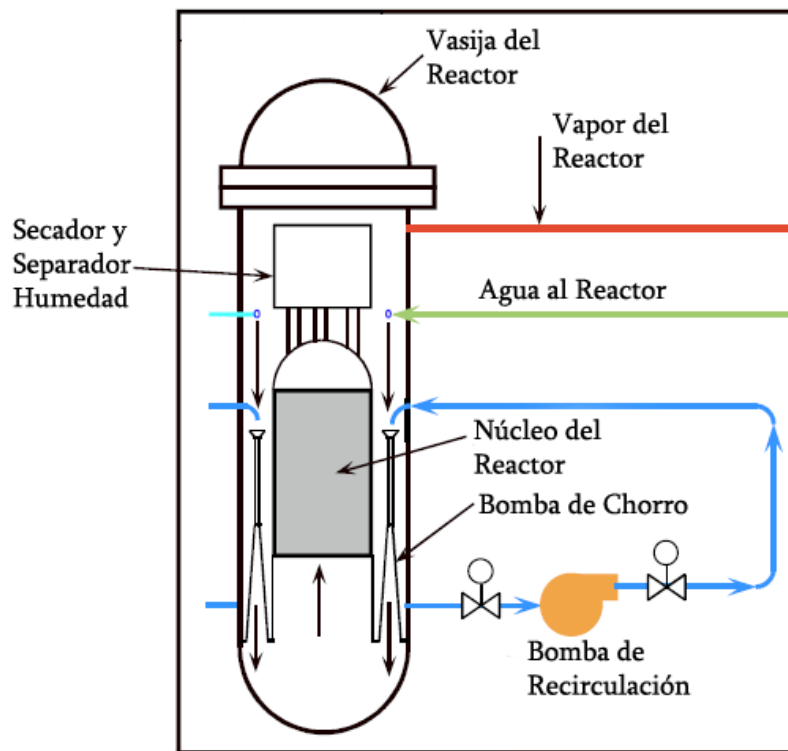


Figura 1. Modelo genérico de la vasija en S3K

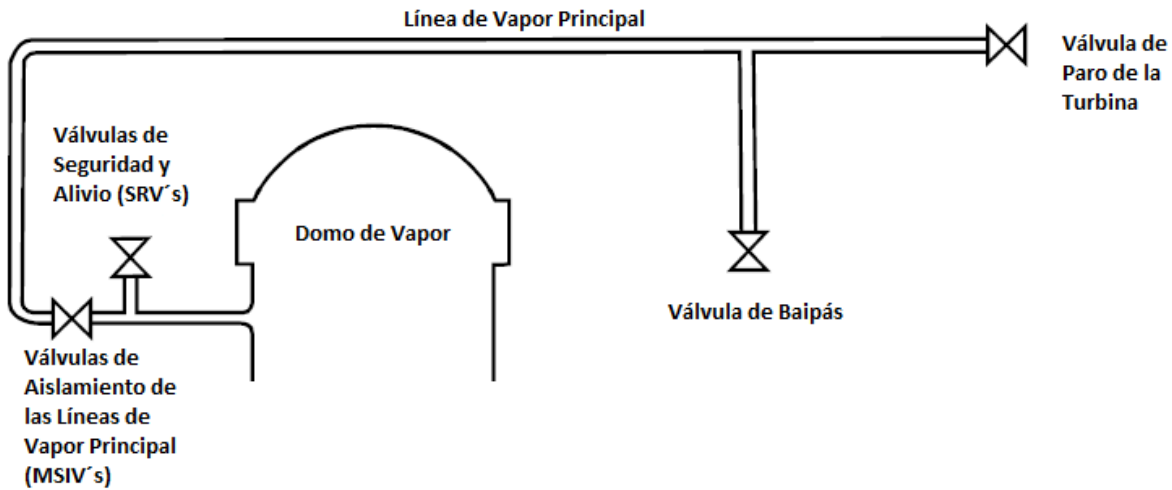
Hay modelos especiales incluidos en S3K para calcular condiciones específicas de flujo en las bombas de recirculación, bombas jet y separadores de vapor. El propósito del modelo de la bomba es predecir la variación del flujo en el núcleo en la ecuación de conservación de momento. La variación de la presión se calcula como una función del flujo y de la velocidad nominal de la bomba, usando curvas homólogas. La velocidad de la bomba se determina mediante una función del tiempo o usando los torques hidráulico, de motor y de fricción. El modelo del separador de

vapor toma en cuenta el flujo de inercia en los separadores de vapor, pérdidas de presión en los separadores y el “carry under”.

## 2.4. Modelo de las Líneas de Vapor del BWR

El modelo de las líneas de vapor es capaz de simular efectos acústicos en las líneas debido a la repentina apertura o cierre de válvulas, permitiendo que las ondas de presión viajen de ida y vuelta a través de las líneas. La Figura 2 muestra esquemáticamente las componentes de las líneas de vapor: la TSV (Turbine Stop Valve), la BV (Bypass Valve), las SRV y las MSIV.

Este modelo no cuenta con las TCV (Turbine Control Valve), sin embargo las TSV pueden tomar su lugar solo adaptando sus lógicas de actuación. Se espera que futuras versiones del código cuenten con ellas.



**Figura 2. Modelo de las líneas de vapor del BWR**

## 3. DESCRIPCIÓN DEL ARCHIVO DE ENTRADA DE S3K

El archivo de entrada desarrollado para la Unidad 1 de la CNLV en S3K se compone de la vasija del reactor, el núcleo del reactor configurado con el combustible específico del ciclo, un modelo de líneas de vapor, un modelo del circuito del agua de recirculación y de agua de alimentación, un modelo de detectores neutrónicos y una correlación en desarrollo para calcular el MCPR. A continuación, se describen las componentes del archivo.

El núcleo del reactor está formado por 444 ensamblajes de combustible, 168 ensamblajes GE12 y 276 GE14, con un enriquecimiento promedio de 3.784 y arreglo geométrico de 10×10. La parte activa del núcleo se dividió en 6 anillos radiales y 25 nodos axiales.

El modelo de agua de alimentación y las líneas de vapor constan de un controlador de agua de alimentación genérico, un modelo de regulador de presión genérico que incluye válvula de bypass y válvula de paro de la turbina, 4 líneas principales e independientes, 10 válvulas de

seguridad y alivio y 129 separadores. Las líneas 1 y 4 tienen la misma longitud, así como 2 y 3 pero distinta a las anteriores. Las 10 SRV se colapsan en 5 pares donde cada par tiene puntos de ajuste de apertura y cierre diferentes, el tiempo de apertura y cierre es el mismo para todas las válvulas.

El modelo de recirculación considera 2 lazos de las mismas características, cada lazo tiene una bomba y un tubo ubicado entre el downcomer y el lower plenum. Los parámetros que describen el funcionamiento de la bomba son su velocidad, el gasto, la densidad del líquido, la carga y el torque. El modelo no cuenta con las FCV explícitamente pero esto se sustituye empleando las curvas de carga y de torque, estas curvas calculan la fracción del flujo nominal en función de los cambios en la carga y el torque de la bomba.

Además cada lazo tiene una bomba jet que representa las 10 bombas jet del lazo, con las mismas características. El modelo de la bomba jet considera el área del nozzle, la longitud del difusor, el área de succión y los coeficientes de pérdida del difusor, del flujo a la succión y del flujo reversible.

Finalmente, el modelo de detectores neutrónicos consta de 96 LPRM, los cuáles se distribuyen de acuerdo al FSAR, y se agrupan en 4 canales APRM con 24 LPRM cada uno para obtener el flujo neutrónico.

#### 4. CONDICIONES INICIALES DEL ARCHIVO DE ENTRADA

La Tabla I muestra las diferencias relativas de los parámetros de S3K respecto al SIIP a condiciones de estado estacionario, las cuales no alcanzan el 1%. El signo positivo significa que el valor de S3K es mayor que el del SIIP y el signo negativo significa lo contrario.

**Tabla I. Condiciones de estado estacionario**

Parámetro	Diff. Rel. (%)
Potencia Térmica	0.00
Presión en el Domo	0.00
Flujo Total a la Entrada del Núcleo	-0.49
Temperatura del Agua de Alimentación	0.00
Flujo Total de Vapor	0.07
Flujo Total de Agua de Alimentación	0.33

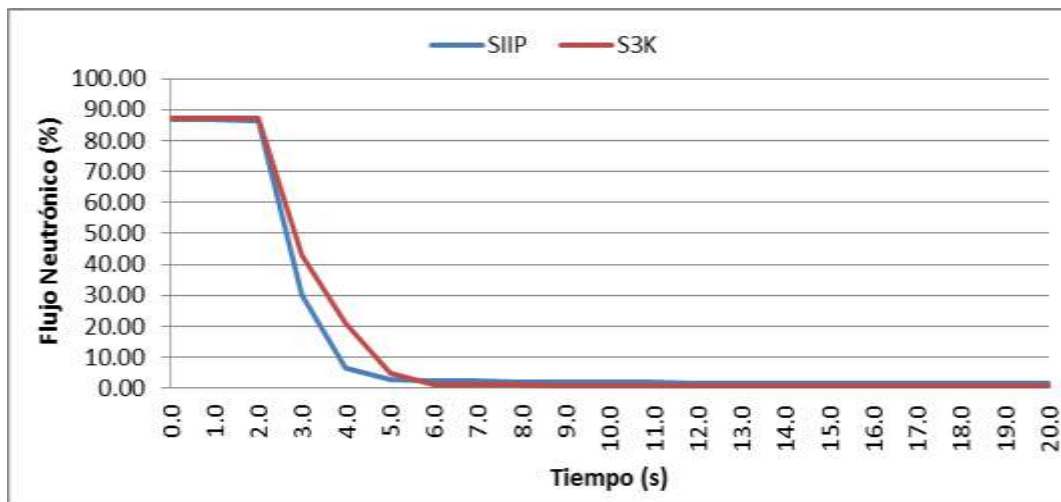
#### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla II se muestra la secuencia de tiempo y eventos que se presentaron durante el transitorio en el SIIP y S3K durante la simulación del transitorio.

**Tabla II. Secuencia de eventos del transitorio Disparo de Turbina en S3K y SIIP**

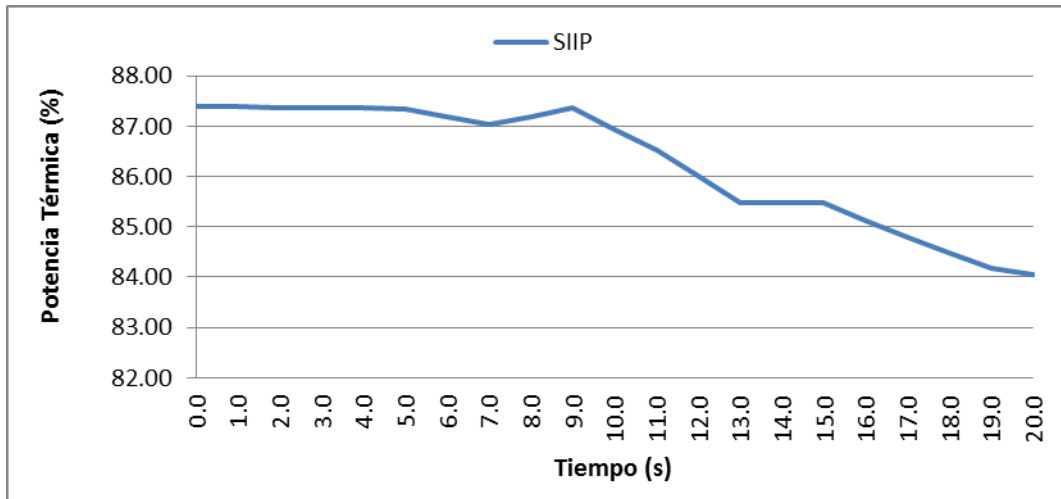
Evento	SIIP (s)	S3K (s)
Operación estado estacionario	0.00	0.00
Inicio del Disparo de Turbina	2.00	2.00
Inicio del cierre de las válvulas de paro	2.00	2.00
Inicio de la apertura de las válvulas de Bypass	2.00	2.00
Inicio del cierre de las válvulas gobernadoras	2.00	2.00
Inicio del SCRAM	3.00	3.00
El flujo neutrónico llega al 5% del nominal	5.00	5.00
Se alcanza la presión más alta en el domo	5.00	8.00
Fin del SCRAM	7.00	7.00
Se alcanza el valor mínimo del MCPR	-----	8.00
Se alcanza el menor flujo del AA	10.00	4.00
Fin de la simulación	20.00	20.00

La Figura 3 muestra el descenso del flujo neutrónico la cual inicia al mismo tiempo sin embargo la pendiente es más pronunciada en el SIIP. La máxima diferencia de valores fue de 14.6% debida probablemente al factor de ganancia de los detectores de la CNLV, aunque se realizarán más comparaciones para corroborar.



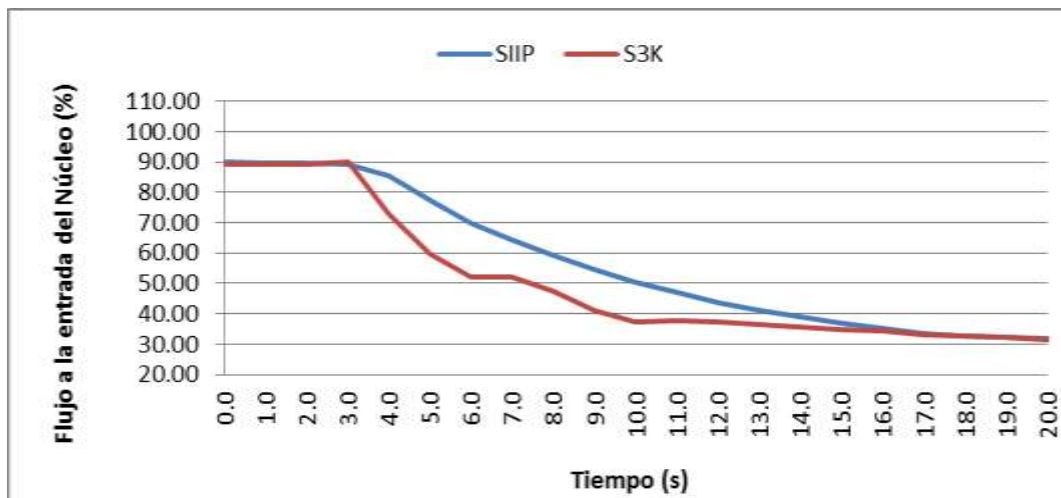
**Figura 3. Flujo Neutrónico**

La Figura 4 presenta el descenso de la potencia térmica del SIIP únicamente, la de S3K no se muestra porque los resultados son similares al flujo neutrónico, por ello se propone analizar con mayor detalle el modelo de transferencia de calor de la pastilla al refrigerante de S3K y calcular la constante del combustible, que de acuerdo a la literatura se encuentra entre los 5 y 10 segundos aproximadamente para el UO<sub>2</sub>.



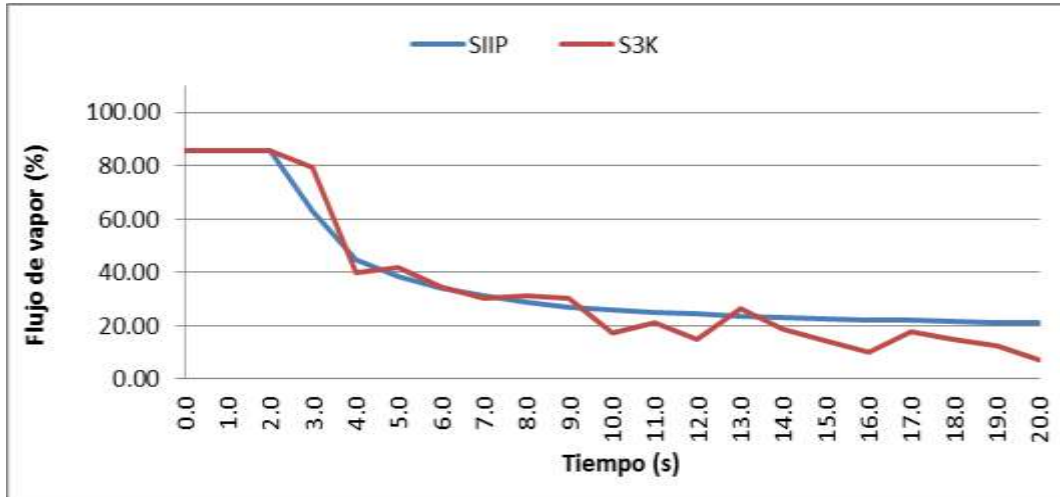
**Figura 4. Potencia Térmica**

La Figura 5 muestra el efecto de la actuación del runback de las bombas de recirculación en el flujo a la entrada del núcleo que el modelo de S3K no tiene, aunque se ha tratado de ajustar las curvas de gasto y torque inicial en el archivo de entrada, es claro que debe trabajarse más.



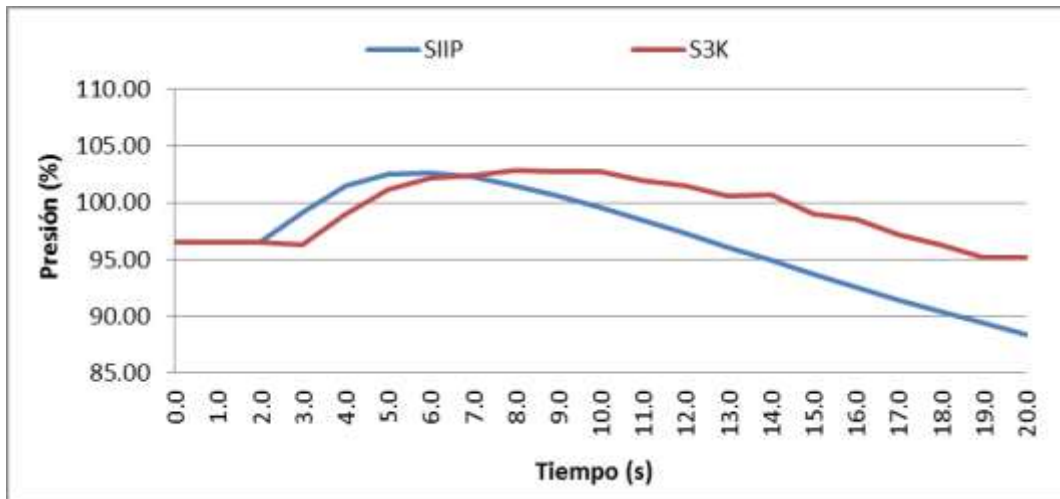
**Figura 5. Flujo a la entrada al núcleo**

En la Figura 6 se observa que el flujo de vapor del SIIP desciende a partir del segundo 2 y un segundo más tarde en S3K, este resultado afecta directamente el tiempo en que la presión alcanzará su máximo debido al efecto de retroalimentación del sistema.



**Figura 6. Flujo de vapor a la salida de la vasija**

Tal y como se esperaba, en la Figura 7 se muestra el desfase de los picos de presión de 3 segundos debido a la diferencia de tiempos en el descenso de vapor y los efectos de retroalimentación. El incremento de la presión no alcanzó más de 5% de la presión nominal en el domo debido a la salida del vapor por las líneas de baipás y el SCRAM. Nótese que para poner en riesgo la integridad de la vasija la presión debe alcanzar un incremento del 22.5% respecto de la presión nominal del domo.

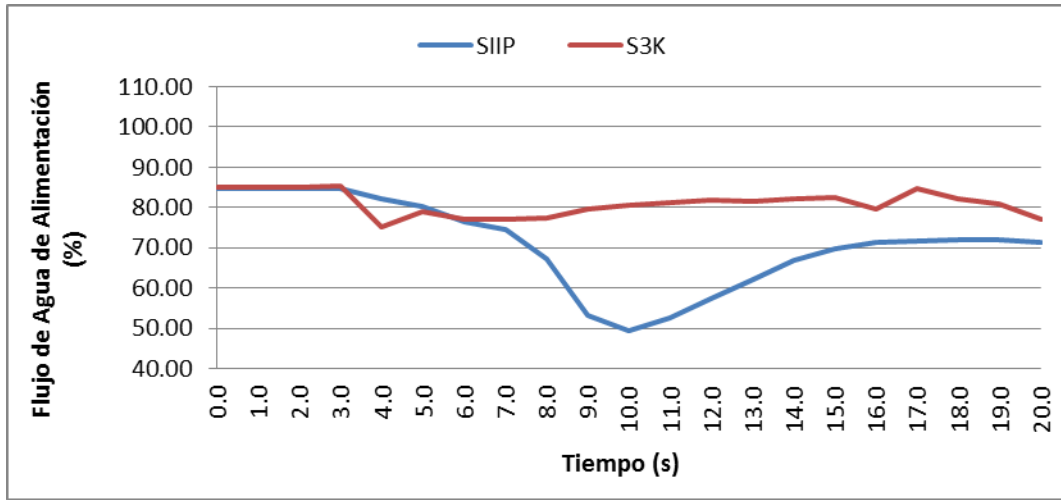


**Figura 7. Presión en el Domo**

La Figura 8 contrasta las diferencias en los flujos de agua de alimentación entre el SIIP y S3K, aunque ambos trabajan con la lógica de tres o un elemento dependiendo del rango operativo, los

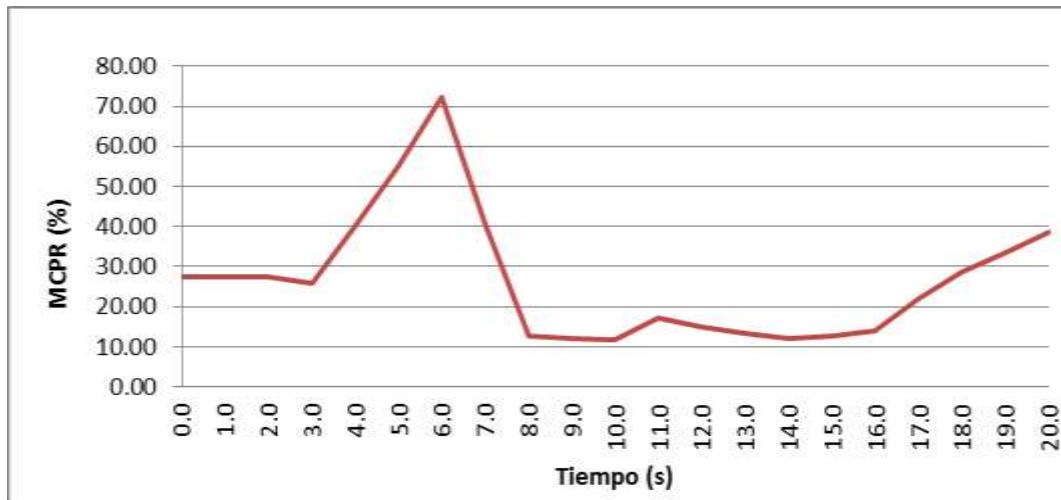


valores usados en el controlador de S3K deben ser ajustados para obtener el comportamiento del controlador de la central. En la actualidad se trabaja con el desarrollador del código para ello.



**Figura 8. Flujo de Agua de Alimentación**

Finalmente, la Figura 9 muestra el resultado del MCPR calculado con una correlación distinta a la del fabricante del combustible, entendiéndose que a menor diferencia porcentual el valor límite del MCPR será alcanzado.



**Figura 9. MCPR obtenido con la correlación incluida en S3K**

## 6. CONCLUSIONES

Con base en los resultados presentados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. A fin de reducir la incertidumbre en la constante del combustible que impacta en el resultado de la potencia térmica, deben actualizarse los datos de los materiales que componen los modelos de barra y celda de combustible en CASMO.
2. A fin de alcanzar diferencias relativas del flujo de agua de alimentación menor al 3%, se recomienda continuar mejorando los modelos del controlador de agua de alimentación y del regulador de presión contenidos en el modelo de S3K.
3. Concluir la incorporación de la correlación del combustible para realizar cálculos independientes del MCPR.
4. Continuar la simulación de más transitorios de planta para ganar mayor confianza en la aplicación de S3K en evaluaciones de seguridad.

## AGRADECIMIENTOS

Al proyecto del Fondo Sectorial SENER-CONACYT Sustentabilidad Energética FSE-2013-04-213519 por el soporte para el desarrollo de este trabajo.

A la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias por el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

A la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde por proporcionar los datos para el estudio comparativo como parte de la solicitud de visita a la CNLV y Simulador.

## REFERENCIAS

1. Christian Jönsson, Lofti Belblidia, Gerardo M. Grandi, “Cycle Specific BWR Reload Analysis Using SIMULATE-3K”, *Advances in Nuclear Fuel Management IV*, South Carolina, USA, April 12-15, 2009.
2. Gerardo M. Grandi, Kord S. Smith, Joel D. Rhodes III, “SIMULATE-3K Models & Methodology”, *Studsvik Scandpower, Proprietary SSP-98/13 Rev. 7*, (July 2011).