

***“EVALUACIÓN TÉRMICA DE LOS GENERADORES DE VAPOR
DE LA CENTRAL NUCLEAR EMBALSE PARA EL PROYECTO
DE EXTENSIÓN DE VIDA”***

***CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE***

Alumno:	Juan Pedro Messiga
Director:	Alejandro Lazarte
Co-director:	Roxana Barsi

Octubre 2017

Agradecimientos

- A mi director del trabajo, Alejandro Lazarte, por su dirección, disposición y esfuerzo.
- A mi co-directora, Roxana Barsi, por su esforzada y meticulosa corrección en los temas vinculados al Proyecto de Extensión de Vida y sistemas de operación de la central.
- A la ARN, por darme un espacio y capacitarme en la disciplina de la seguridad nuclear.

Índice

Capítulo 1:

1.1. Introducción.....	6
1.2. Antecedentes.....	8
1.3. Objetivo.....	8
1.4. Estructura.....	9

Capítulo 2:

2.1. Descripción de un reactor CANDU 6.....	10
2.2. Descripción de un Generador de Vapor de un reactor CANDU 6.....	13

Capítulo 3:

3.1. Cálculo analítico y modelado del Generador de Vapor por el código TRACE5	19
3.2. Desarrollo del cálculo analítico.....	20
3.3. Datos de entrada y desarrollo del cálculo.....	28
3.4. El programa TRACE5.....	30
3.5. Modelado del GV por medio de TRACE5.....	33

Capítulo 4:

4.1. Resultados.....	41
----------------------	----

Capítulo 5:

5.1. Conclusiones.....	46
5.2. Referencias.....	48

Anexos

Anexo – Cálculo del ensuciamiento para el cálculo analítico.....	51
--	----

ABREVIATURAS

AECL	Atomic Energy Canada Limited
ARN	Autoridad Regulatoria Nuclear
CNE	Central Nuclear Embalse
EECC	Elementos combustibles
EOL	Fin de Vida (End of Life)
FW	Agua de Alimentación (Feed-Water)
GV	Generador de Vapor
BOL	Principio de Vida (Beginning of Life)
PEV	Proyecto de Extensión de Vida
SPTC	Sistema Primario de Transporte de Calor
VC	Volumen de Control

SIMBOLOS

A	Área de transferencia térmica en el VC
D_o	Diámetro exterior de tubos del GV
$D_{h,T}$	Diámetro hidráulico de tubos del GV, igual al diámetro interno de tubos
$D_{h,C}$	Diámetro hidráulico de la carcasa
$DMLT$	Diferencia media logarítmica de temperaturas
G_{LO}	Densidad de flujo másico con caudal de condensado a la salida del VC
K	Conductividad térmica
N	Número de tubos del GV
P	Potencia intercambiada en el VC
P_r	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds
R_f	Coeficiente de ensuciamiento
T_E	Temperatura de entrada al VC, lado tubos
$T_{E,1}$	Temperatura de entrada del lado tubos en un VC en el precalentador
$T_{E,p}$	Temperatura de entrada de FW (carcasa) en un VC del precalentador
T_S	Temperatura de salida al VC, lado de tubos
$T_{S,1}$	Temperatura de salida del lado tubos en un VC en el precalentador
$T_{S,p}$	Temperatura de salida de FW (carcasa) en un VC del precalentador
T_C	Temperatura del lado carcasa
x_E^C	Título de entrada del VC, lado carcasa
x_S^C	Título de salida del VC, lado carcasa
$c_{p,p}$	Calor específico en VC del precalentador, lado secundario
$c_{p,T}$	Calor específico del agua pesada del lado de tubos en el VC
$c_{p,1}$	Calor específico en VC del precalentador, lado primario
h	Coeficiente de transferencia de calor
h_T	Coeficiente de transferencia de calor del lado tubos
h_C	Coeficiente de transferencia de calor del lado carcasa
h_M	Coeficiente de transferencia de calor por macroconvección
h_m	Coeficiente de transferencia de calor por microconvección
p	Presión en la carcasa
p_c	Presión crítica
q	Flujo calórico en el VC
w_C	Caudal del lado carcasa
w_T	Caudal de tubos
x_E^T	Título de vapor del agua de tubos en la entrada del VC



Instituto de Tecnología Nuclear

x_S^T	Título de vapor del agua de tubos en la salida del VC
ΔL	Largo de tubos en el VC (coincide con la altura del VC)
λ	Calor latente de vaporización, lado carcasa
μ_L	Viscosidad dinámica del líquido
ρ	Densidad



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El calor generado por la reacción de fisión en un reactor nuclear se utiliza, en mayor parte, para producir vapor del lado secundario en los generadores de vapor (GVs) de la central. El vapor circula por una turbina, cuyo fin último es producir energía eléctrica. El vapor que sale de la turbina es condensado y devuelto a los GVs. En centrales del tipo CANDU este ciclo se repite en períodos de arranque y operación normal.

Los GVs son los equipos que, en centrales nucleares, producen el vapor por intercambio de calor entre el lado primario y secundario. En el interior de estos equipos (del lado secundario) se encuentra agua líquida y vapor en estado de saturación a una temperatura que depende del control de turbina. Durante la operación normal, los GVs reciben el agua de alimentación, que es vaporizada a través de un intercambio térmico con el agua del primario (que circula por el mazo de tubos en U) para dirigirse hacia la turbina. Además, los GVs sirven para extraer el calor residual cuando la central nuclear se encuentra parando o durante un accidente.



Las centrales nucleares tipo CANDU tienen una vida útil de aproximadamente 30 años (a plena potencia). Sin embargo, estudios de factibilidad realizados en este tipo de centrales demostraron que es posible reacondicionar la instalación para que la misma extienda su período de operación. Luego de finalizado el primer período de operación, las entidades competentes estudian si es factible realizar modificaciones y mejoras a la instalación para continuar su operación. Si se decide continuar con un segundo período de operación, las modificaciones y mejoras se implementan. A este proceso de estudios y realización de mejoras se lo llama “Proyecto de Extensión de Vida (PEV)”. En la central nuclear Point Lepreau (ubicada en la ciudad de New Brunswick, Canadá), por ejemplo, se realizó un proceso de reacondicionamiento para que la misma tenga un segundo período de operación [1].

En el caso de la CNE, entró en servicio comercial en 1984 y actualmente está en proceso de reacondicionamiento. Antes de finalizar su operación, se iniciaron las evaluaciones de estado y de vida, y se concluyó que se realizarían cambios en componentes y mejoras para que dicha central nuclear tenga un nuevo período de operación. Como resultados de estos estudios, los cartuchos de los generadores de vapor se reemplazan, ya que han tenido una importante degradación. Como parte del seguimiento y del licenciamiento de la CNE para el nuevo ciclo de operación, la ARN aprobó las modificaciones y/o cambios de diseño con impacto en la seguridad nuclear. Entre varias de las tareas que está realizando la ARN (dentro del marco del licenciamiento de la central), una de ellas está relacionada con el reemplazo de los cartuchos de los GVs. En este trabajo se destaca la verificación de la capacidad de transferencia térmica de los nuevos cartuchos. De particular importancia es el largo de tubos, el cual aumenta. Por eso, el área de transferencia térmica pasa de 2750 m^2 a 3195 m^2 , cambio que responde a un aumento de la potencia térmica del reactor. O sea, se debe verificar que, durante toda la vida útil remanente de la instalación, puedan transferir al secundario, entre los cuatro generadores de vapor, la máxima potencia térmica del reactor en condiciones normales de operación, la cual es de aproximadamente 516 MW por cada GV.

Como parte de la evaluación de los nuevos GVs, dentro del marco del licenciamiento del PEV de la CNE que realiza la ARN, se analizó en este trabajo la transferencia térmica de estos equipos en distintas condiciones de operación. Se realizó un cálculo analítico y una simulación por medio del código de sistemas TRACE5 para verificar la transferencia térmica. Además, se compararon los resultados obtenidos por medio de TRACE5 y el cálculo analítico con la verificación de los GVs realizada en [2].

1.2. ANTECEDENTES

Los GVs sufren un desgaste continuo durante operación, producto de distintos fenómenos de corrosión. Entre ellos se puede citar el FAC (Corrosión asistida por flujo, ver referencia [3]), vibraciones inducidas por el flujo (para más información, ver referencia [4]), e incluso ensuciamiento (se recomienda la referencia [5]). Debido a este desgaste, como ya fue mencionado, se reemplazarán los cartuchos de los GVs. Por eso, se verificó la transferencia de calor del nuevo diseño de los GVs, elaborando un informe en que realiza un cálculo analítico para analizar la aptitud de los nuevos equipos. Este informe se tomó como base para este trabajo.

Además del mencionado trabajo, se han realizado estudios determinísticos de accidentes en la CNE utilizando el programa RELAP5 (más adelante hay una explicación de este programa). En estos trabajos se requirió modelar los GVs de la mencionada central. Por ejemplo, se estudió la rotura de la línea de vapor dentro de la contención [6] o una pérdida de refrigerante por rotura del 2,5% del área de un colector de entrada [7]. Los estudios determinísticos realizados también se utilizaron de base para este trabajo.

1.3. OBJETIVO Y MOTIVACIÓN

El objetivo del trabajo es calcular por medio del modelado la distribución de temperaturas en el GV, y la potencia que intercambia entre el lado primario y el secundario. Esto permitirá analizar si el nuevo diseño de los generadores de vapor es apto para el segundo ciclo de operación de la central para distintas condiciones de operación.

Este trabajo contiene los siguientes objetivos particulares:

- i. Descripción de la ingeniería básica del generador de vapor.
- ii. Desarrollo de un modelo con correlaciones apropiadas para evaluar la transferencia de calor en el componente.
- iii. Discusión sobre las hipótesis asumidas, las condiciones de contorno y aproximaciones y simplificaciones realizadas.
- iv. Cálculo de coeficientes de transferencia y condiciones operativas a principio y fin de vida.
- v. Los resultados del cálculo y conclusiones.

Este trabajo surge para sumarle un modelado de los GVs por medio de un programa de simulación a un informe elaborado por ARN sobre la capacidad de transferencia térmica de los nuevos GVs.

1.4. ESTRUCTURA

Este trabajo consta de cuatro capítulos, descontando la introducción. Los mismos se describen a continuación:

1. Descripción de generador de vapor: Se realiza una descripción de los GVs de la CNE, explicando a qué se denomina “lados” y qué los caracteriza. Además, se describen componentes internos del equipo, como los separadores de humedad, y cómo estos se deterioran durante la operación. También se explica qué consecuencias tiene este deterioro para la capacidad de transferencia térmica del equipo y en las variables de proceso. Finalmente se hace una comparación entre los GVs nuevos y los viejos, se define BOL y EOL.
2. Modelado del generador de vapor: En este capítulo se desarrolla el cálculo analítico realizado para determinar la potencia de los GVs, describiendo el procedimiento de cálculo. Además, se presentan los datos de entrada para el cálculo. Por otro lado, también se presenta el programa TRACE5 y se describe detalladamente el modelo de GV que se realizó en este programa. Finalmente, también se presentan las herramientas utilizadas.
3. Resultados: Los resultados obtenidos del cálculo analítico y el programa TRACE5 se presentan en este capítulo.
4. Conclusiones: Se finaliza este trabajo realizando una discusión de los resultados obtenidos. Además, se presenta una discusión final sobre las futuras tareas a desarrollar.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DE UN GENERADOR DE VAPOR DE UN CANDU 6

2.1. DESCRIPCIÓN DE UN REACTOR CANDU 6

La Central Nuclear Embalse es un reactor tipo CANDU 6. El SPTC de la CNE está compuesto por los canales combustibles (alojados en el recipiente de calandria, el cual contiene el moderador además de varios internos como los detectores de flujo neutrónico, las barras ajustadoras, absorbedoras y de parada, etc.), cuatro generadores de vapor, cuatro bombas principales, cuatro colectores de entrada, cuatro colectores de salida, 380 canales combustibles (los cuales contienen el tubo de calandria, el espacio anular, el tubo de presión y los elementos combustibles) conectados con 760 alimentadores de entrada y salida. Además, el SPTC tiene un



presurizador y los sistemas de cañerías que interconectan los equipos. Un esquema del sistema se encuentra en la Figura 1, obtenida de [8]:

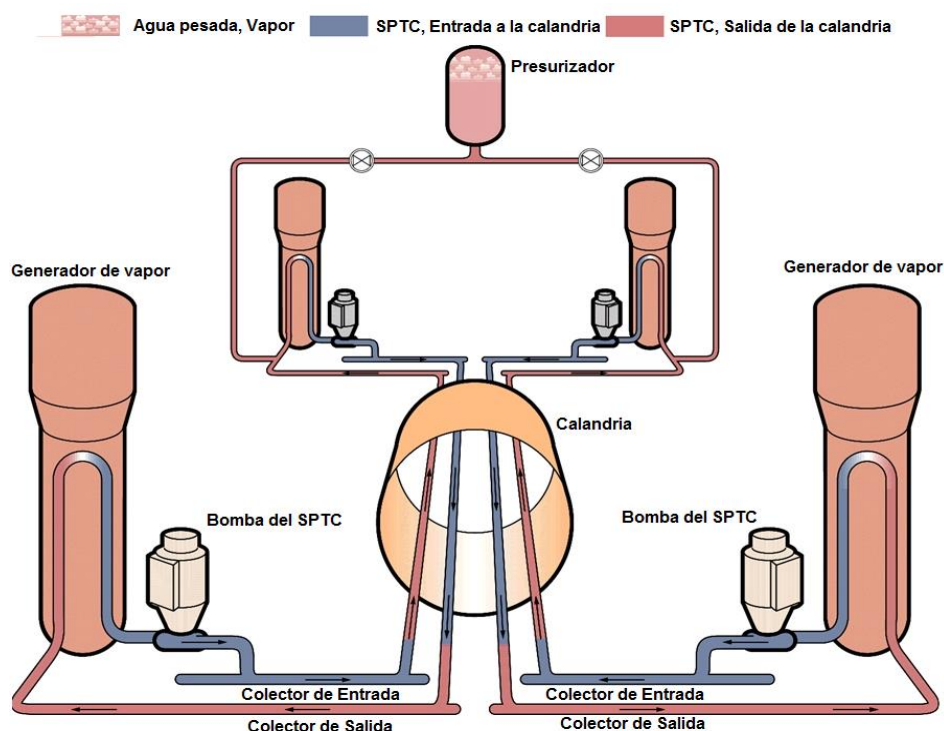


Figura 1: Sistema primario de la CNE [8].

El reactor de la CNE utiliza uranio natural como combustible y D₂O como refrigerante y moderador. Cada elemento combustible tiene 37 barras combustibles, de sección circular, dispuestas en anillos concéntricos. Los anillos se encuentran soldados a las llamadas grillas, las cuales aportan rigidez a la estructura [9]. Los EECC están contruidos de zircalloy-4 y tienen un largo de 0,495 metros. El diámetro interno de las barras es de aproximadamente 12,66 mm y el externo es 13,08 mm.

A continuación se describirá el SPTC de la CNE. Este está separado en dos circuitos independientes, pero que solo se encuentran interconectados a través de una de las cañerías del presurizador y del sistema de purificación. Cada circuito tiene dos generadores de vapor, dos bombas, dos colectores de entrada y dos de salida y 190 alimentadores de entrada e igual número de alimentadores de salida. Como el SPTC está separado en dos circuitos, resulta en una “figura de ocho” con la calandria en el centro. Esto quiere decir que cada uno de los dos circuitos tiene dos pasos por el núcleo. Por eso, en cada colector de entrada está conectado a 95 alimentadores de

entrada y cada colector de salida está conectado a igual número de alimentadores de salida.

El refrigerante es impulsado por dos bombas primarias en cada circuito hacia un colector de entrada, donde se distribuye, a través de 95 alimentadores de entrada, en igual número de canales combustibles. El refrigerante pasa a través de los canales, absorbe el calor de fisión y sale del reactor por 95 alimentadores de salida. Estos se conectan a uno de los colector de salida del circuito, por lo que el refrigerante pasa a través de este. Se dirige hacia uno de los dos generadores de vapor del circuito, donde transfiere el exceso de calor absorbido en su pasaje por el núcleo. Luego, el refrigerante es impulsado por la otra bomba del circuito hacia un colector de entrada, vuelve a circular a través del núcleo (absorbiendo nuevamente el calor de fisión) y sale por el otro colector de salida. Finalmente, circula por el otro generador de vapor del circuito y al salir de este es impulsado por la primera bomba. Así, se repite el ciclo.

Dependiendo de la potencia del reactor, las variables de proceso como la temperatura, cambian. En plena potencia, por ejemplo, la temperatura del fluido refrigerante en el colector de entrada es 261°C (para una planta no envejecida) y 310 °C a la salida. Además, se espera un título de vapor del 1% en el colector de salida (pudiéndose alcanzar hasta el 4%). La presión en el colector de entrada está fijada por la bomba y las pérdidas de carga del circuito, y en el colector de salida es regulada por el sistema de control de presión (por medio del presurizador) en 99,9 bar. El caudal que circula por el núcleo resulta de aproximadamente 8400 kg/s, dando en promedio 2100 kg/s por paso.

Los EECC están ubicados dentro de los tubos de presión, los cuales son refrigerados por el agua pesada del SPTC. Cada uno de estos tubos se encuentra dentro de un tubo de calandria. En el espacio anular que separa a ambos tubos se encuentra el gas anular dióxido de carbono gaseoso seco que aísla térmicamente el sistema primario del sistema moderador. Dentro de la calandria se encuentra moderador, que permanece a baja temperatura comparada con el sistema primario, aproximadamente 70°C a 74 °C y a 1 bar de presión. Como ya fue mencionado, dentro de la calandria también se encuentra el núcleo con los elementos combustibles (ya descriptos). Si se desea conocer más sobre el reactor CANDU 6 se puede recurrir a [9].

El presurizador se conecta a dos de los colectores de salida del reactor como se observa en la Figura 1. Este tiene como función controlar la presión del sistema primario teniendo en cuenta las dilataciones desde potencia cero caliente a plena potencia, ver referencia [10]. Para cumplir sus funciones, el presurizador dispone de

un sistema de cinco calefactores (de 200 kW cada uno) que calientan el agua del presurizador. También tiene cuatro válvulas de descarga de vapor para disminuir la presión.

Varios sistemas se encuentran conectados al SPTC, en las referencias [11] y [12]. Algunos de ellos son:

- Sistema de Refrigeración de Emergencia del Núcleo (REN): Este sistema está diseñado para actuar en caso de accidentes con pérdida de refrigerante (LOCA). Su función es inyectar agua liviana dentro del SPTC para compensar la falta de refrigerante que salió por la cañería rota. El sistema REN tiene tres etapas, las cuales actúan a medida que disminuye la presión del primario. La última consiste en la refrigeración del núcleo a largo plazo.
- Sistema de parada N°1: Este sistema consta de 28 barras de corte verticales de un material absorbente de neutrones. Cuando se genera la señal de disparo del reactor, las barras caen en el reactor, absorbiendo neutrones y, consecuentemente, deteniendo el reactor. Para conocer más sobre este sistema se recomienda la referencia [12].
- Sistemas de parada N°2: Su objetivo es detener el reactor rápidamente. Para esto, dispone de un tanque de helio presurizado, conectado por medio de válvulas de apertura rápida, a seis tanques que contienen una solución de nitrato de gadolinio, en suficiente cantidad para detener el reactor. Cada uno de estos tanques, a su vez, se encuentran conectados a una boquilla que entra al moderador dentro de la calandria. Cuando se genera la señal de disparo, se abren las válvulas de apertura rápida, y el helio impulsa la solución de gadolinio a la calandria.
- Sistema de Control de Presión e Inventario (PIC): Este sistema tiene como fin controlar la presión y el inventario de agua pesada del SPTC. Dentro del PIC se encuentra el presurizador, un condensador desgasificador, los circuitos de alimentación y purga, entre otros. Para obtener más información sobre este sistema se recomienda recurrir a la referencia [10].

2.2. DESCRIPCIÓN DE UN GENERADOR DE VAPOR DE UN REACTOR CANDU 6

Los generadores de vapor de las centrales térmicas tienen como función producir vapor seco saturado o sobrecalentado que es transportado a las turbinas, de alta y baja presión.

En el caso de centrales nucleares tipo CANDU, en los GVs, el agua pesada (del lado primario) transfiere calor al agua liviana del lado secundario. Un esquema de un GV representativo de los diseños CANDU se encuentra en la Figura 2. Al igual que un intercambiador de calor de carcasa y tubos (para ver una descripción más detallada de uno de estos equipos se recomienda la referencia [13]), en un GV se tienen dos lados:

- Lado tubos: el agua del sistema primario de transporte de calor entra por la zona inferior de los tubos (llamada boquilla de entrada) asciende por los tubos, llegan a un codo de 180° y luego el fluido desciende en sentido contrario al del ascenso. Así, antes de alcanzar la boquilla de salida, el agua del primario intercambia calor mientras atraviesa el manojo de tubos, y luego sale del GV. El manojo de tubos es de Incoloy 800 y están dispuestos en forma triangular (cada conjunto de tres tubos se encuentran dispuestos en los vértices de un triángulo imaginario).
- Lado carcasa, precalentador: el agua de alimentación que ingresa en la carcasa primero intercambia calor en el precalentador. El precalentador es una sección sinuosa que contiene deflectores que aumentan la velocidad del fluido, para aumentar la transferencia de calor y consecuentemente mejorar la eficiencia térmica del equipo. Los precalentadores son típicos de los GVs de las centrales CANDU. En esta sección de los GVs la transferencia térmica es por calor sensible. Luego de pasar por el precalentador, el agua de alimentación entra en la carcasa cerca de la parte inferior del GV y fluye alrededor de los tubos, absorbiendo calor del refrigerante del primario. La mezcla de agua y vapor asciende por el “riser” hacia la parte superior, donde se encuentran los ciclones y la boquilla de salida del GV. Al pasar por estos, el vapor se seca y finalmente, sale por la boquilla. Mientras, el agua separada en el ciclón fluye hacia la parte inferior del GV por medio de un conducto anular. En esta parte vuelve a intercambiar calor con el primario (y formar vapor) y luego se mezcla con el agua que sale del precalentador. Finalmente, se repite el ciclo.

Los distintos materiales de cada uno de los componentes del GV se encuentran listados en [5]. Se recomienda recurrir a esta referencia si se requiere más información sobre los materiales del equipo.

En la Figura 2 se observa que el tambor de vapor aumenta su diámetro en la zona superior del GV. Es en esta zona en que se encuentran los separadores de humedad ciclónicos primarios. Este tipo de separadores se basan en:

- La fuerza centrífuga
- Los cambios de dirección del vapor en el separador
- La diferencia de masa entre partículas de vapor y agua líquida, al ser más pesada tiene una inercia mayor.

En el separador de humedad las partículas de agua son empujadas por la fuerza centrífuga hacia las paredes, donde luego caen por gravedad hacia el ánulo del GV. Además, los cambios de velocidad de vapor en el separador llevan a que las partículas de agua, por tener una inercia mayor que el vapor, no cambien de velocidad lo suficientemente rápido para seguir la corriente de vapor. Por eso, chocan contra las paredes y caen por gravedad.

Estos son los dos mecanismos que utilizan los separadores de humedad ciclónicos primarios para extraer las gotas de agua del vapor. El vapor que atraviesa los separadores de humedad no tiene un título apto para la turbina. Es por eso que a la salida de los GVs se ubican los separadores ciclónicos secundarios, los cuales logran un título que no dañe la turbina.

Luego de pasar por los separadores ciclónicos de humedad, el vapor sale por la boquilla de salida, ubicada en la parte superior del GV. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el caudal de vapor arrastra partículas de agua líquida y el de agua arrastra también vapor. Por eso, cada separador tiene un título de vapor mínimo que asegura cierta proporción máxima de agua líquida en el caudal de vapor. En el caso de los separadores de humedad de la CNE, se logra un título de vapor superior a 99,75%[5].

Para una descripción más detallada se recomienda la referencia [14]. En la referencia [15] se puede ver en detalle un plano de los GVs de la CNE.

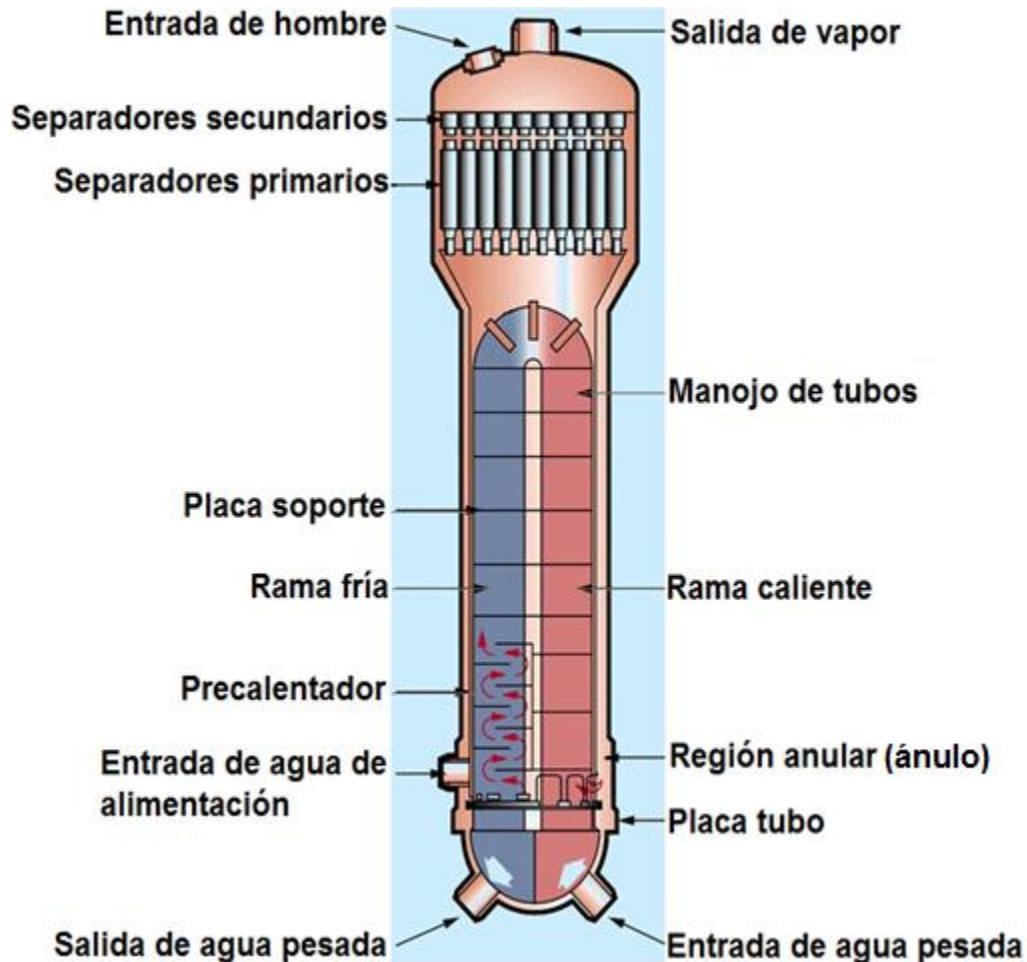


Figura 2. Esquema de un GV de la CNE. Los recuadros rojos separan las dos regiones del manojo de tubos (ver capítulo 3). Imagen tomada de [8].

Como ya fue mencionado, cuando la planta se encuentra en operación normal, en la región anular del lado secundario se establece un caudal que depende del nivel de agua en esta región. Cuando se aumenta el caudal de vapor (lo que se realiza aumentando la potencia transferida al GV), este nivel disminuye. A su vez, cuando aumenta el caudal de agua de alimentación, el nivel de agua de la región anular aumenta. Es por esto que las mayores perturbaciones del control el nivel del GV son las del caudal de vapor y el agua de alimentación. Para obtener más información se recomienda la referencia [11].

El nivel del GV cuenta con un sistema de control que, con las mediciones de planta, actúa para fijar el nivel en un valor de consigna. El control de nivel del GV está formado por dos términos, cuyos objetivos son:

- Término de realimentación anticipada:
 - Control del balance de masa en el GV.
 - Compensar la contracción o dilatación del nivel del GV durante la maniobra de potencia.
 - Compensar los efectos de la temperatura del agua de alimentación sobre el nivel del agua.
- Término de realimentación de nivel: Compara el valor de referencia del nivel con el valor actual y lo corrige, realizando así el control final del nivel del GV.

El lado de tubos del GV se encuentra presurizado a la presión del primario. Es por esto que debe diseñarse el GV no solo para transferir la potencia térmica de diseño sino también que los materiales del equipo resistan la presión diferencial entre el lado primario y el secundario durante toda la vida útil de la central, teniendo en cuenta los lineamientos de la norma ASME IIIC, tal como se informa en [16]. Además, los materiales del equipo deben estar preparados para resistir otros fenómenos que pueden ocurrir durante situaciones normales y, por tiempos limitados, en situaciones incidentales como: la fatiga térmica, las vibraciones de los tubos asistidas por el pasaje del agua del primario o del lado secundario, distintas formas de corrosión, etc. Una mejor descripción del fenómeno de corrosión y de los efectos de las vibraciones y la fatiga se encuentran en las referencias [3], [4], [5] y [17]. Todo esto lleva a que, con el transcurso de la vida útil de la central, los internos del GV, como la placa-tubo, las placas soporte, los tubos, etc. se deterioren y en algún caso lleguen a fallar.

Cuando se produce la fisura de un tubo (por algún fenómeno de corrosión), dada la diferencia de presión existente entre primario y secundario del GV, se produce el pasaje de agua pesada hacia el secundario. Existen distintas formas de detectar estas fugas. Por ejemplo, puede ser detectada por medio de un espectrómetro ubicado en la salida de vapor del GV N°1 [11], determinando la concentración de agua pesada en el vapor que sale del equipo. También, estas fugas pueden ser detectadas por medio de los detectores de radiación en la purga de los GVs. Cuando las fugas de agua pesada alcanzan los límites y criterios presentados en la referencia [11], se debe detener el reactor. Se identifica la pérdida y se obtura el tubo. En algunos casos, puede decidirse obturar preventivamente un tubo (ver referencia [5]). De esta forma, el área de

transferencia térmica se ve afectada. Además, a medida que transcurre la vida útil del equipo, tanto en el interior como en el exterior de los tubos se depositan impurezas del agua. Estas actúan como una resistencia térmica adicional que degrada la transferencia de calor. Esta resistencia térmica adicional puede estimarse de la experiencia operativa de GVs que operaron en situaciones similares, o incluso puede utilizarse la experiencia operativa de la misma central para su segundo período de vida útil.

Como la transferencia de energía en el GV se ve afectada a medida que transcurre la vida útil de la central (por acumulación de impurezas y obturación de tubos), la temperatura de salida del GV en el primario (o el título de vapor, de haber) aumenta, lo cual provoca el aumento de temperatura en la entrada del reactor. Por eso, en este trabajo se analizará el funcionamiento del GV en dos etapas de operación diferentes:

- Principio de vida: Corresponde al momento en que el GV comienza la operación. En este caso, el equipo no tiene tubos obturados ni impurezas en las caras interior y exterior de tubos. Por eso, se espera menores pérdidas de carga en el primario y mayor caudal de agua pesada.
- Fin de vida: Corresponde al momento en que termina la vida útil de la planta. En este caso, el equipo podría tener impurezas depositadas por dentro y por afuera de los tubos o bien, varios de estos pueden encontrarse obturados. Por eso, las pérdidas de carga se incrementan y el caudal del primario es menor al de principio de vida. Además, el área de transferencia disminuye por el taponamiento de tubos.

Como ya se mencionó, la temperatura de salida del GV aumenta en el transcurso de la operación de la planta, ya sea por la disminución del área de transferencia térmica (producto de la obturación de tubos), que provoca una disminución de la transferencia térmica, o por impurezas (en el anexo de este trabajo se presenta una explicación de esto). Debido a lo anterior, también hay un aumento de la temperatura de entrada al GV, y la central llega a un nuevo equilibrio térmico para el sistema primario. Cabe agregar que cuando la temperatura de entrada al GV en el primario llega a saturación, la temperatura se mantiene constante mientras que su título de vapor aumenta. Esto se observó en la CNE a medida que transcurrió su vida útil.

CAPÍTULO 3

MODELADO DEL GENERADOR DE VAPOR

3.1. CÁLCULO ANALÍTICO Y MODELADO DEL GENERADOR DE VAPOR MEDIANTE CODIGO DE SISTEMAS

En este capítulo se presentará el desarrollo de un modelo analítico y con un código de sistemas denominado TRACE5 para el cálculo de la transferencia térmica de un GV típico de un CANDU 6. Tanto los cálculos como el modelo se realizaron para principio y fin de vida de la central, equivalentes al nuevo ciclo de operación. Estos cálculos se realizaron para verificar que los nuevos GVs de la CNE, que tienen mayor área de transferencia y deben intercambiar una mayor potencia, cumplen correctamente con la transferencia térmica, llevando el calor generado en el reactor del primario hacia el secundario.

3.2. DESARROLLO DEL CÁLCULO ANALÍTICO

El cálculo analítico consistió en determinar la potencia térmica transferida entre primario y secundario en operación a plena potencia. Esto se realizó para analizar si el GV permite extraer toda la potencia para la que fue diseñado. Además, sirve como base de comparación para la simulación realizada en TRACE5.

El cálculo analítico se realizó teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

- Estado estacionario y propiedades constantes
- La resistencia térmica en la pared que separa ambos fluidos (las paredes de los tubos, en el caso de un GV) es despreciable frente a la de los fluidos de ambos lados.
- El perfil de temperaturas y velocidades es plano en el eje radial
- No hay pérdida de calor hacia el exterior ni pasaje de agua pesada hacia el secundario.
- Se desprecia el aumento de temperatura debido a la fricción

La transferencia térmica se calcula con la siguiente expresión:

$$P = \left(\frac{1}{h_T} + \frac{1}{h_C} + R_f \right)^{-1} A DMLT \quad (1)$$

Para realizar el cálculo analítico se consideró al GV dividido en volúmenes de control (VCs), todos iguales entre sí. En cada uno de ellos se transfiere parte del calor del primario al sistema secundario. Por lo tanto, la potencia total intercambiada será la suma de cada potencia individual en cada VC. Se tuvieron en cuenta, además, las siguientes condiciones de contorno para realizar el cálculo:

1. El lado primario se considera isobárico a 99,9 bar.
2. Para el caudal en el ánulo y el agua de alimentación se tomaron los caudales de [2].
3. La presión en la carcasa depende de la altura de la columna de agua liviana y la presión de saturación de esta.
4. Se consideró que las propiedades térmicas varían linealmente con la temperatura, excepto para el calor específico y la conductividad térmica, que se consideró una interpolación cuadrática.
5. En EOL se taparon el 5% de los tubos. Este dato surge de la experiencia operativa de CNE [18]. Es el máximo porcentaje de tubos fallados que se presentó entre los cuatro GVs durante el primer ciclo de operación. Cabe

agregar este valor resultara muy conservativo porque se han realizado modificaciones en la placa tubo para reducir la cantidad de tubos que pudiesen dañarse por vibración inducida por flujo (VIF) [19].

6. El agua del lado secundario se encuentra suficientemente mezclada como para que el título de vapor a una misma altura del manojo de tubos sea el mismo.
7. La condensación y la evaporación se da a temperatura constante.

Este cálculo se realizó dividiendo al GV en 196 volúmenes de control. En cada VC saldrán dos caudales y entrarán otras dos. Estas son las siguientes:

- Caudales de entrada y salida de agua pesada del primario, lado tubos. Dependiendo de la ubicación del VC en el GV, se busca calcular la temperatura de salida conociendo la de entrada o al revés.
- Caudal de entrada de agua liviana del secundario, se conoce su temperatura y su título. Lado carcasa.
- Caudal de salida de agua liviana del secundario, se conoce su temperatura pero no su título. Lado carcasa.

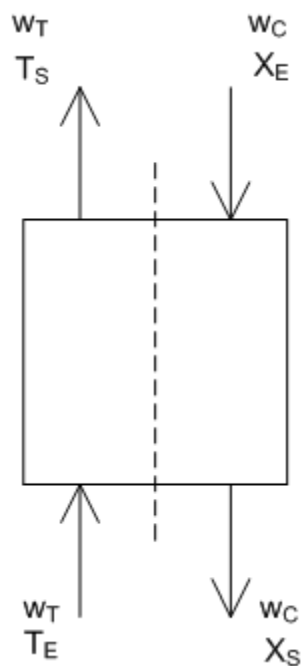


Figura 3: Balance de masa y energía en un VC genérico.

El manojo de tubos se puede separar en dos regiones (la rama fría y la rama caliente, ver Figura 2). Una de ellas es la región derecha, por donde es el ingreso de agua del

primario y la otra es la región izquierda. En la siguiente figura se realiza un esquema del GV con sus VC. En esta se enumeran los VC de uno hasta N, que equivale a 196 para ambos estados de operación.

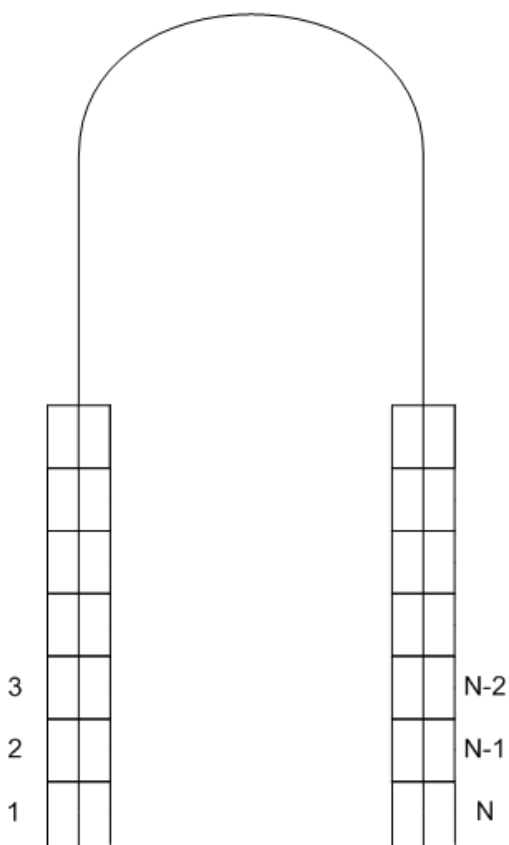


Figura 4: Disposición de los VC en el GV.

Como punto de partida, se considera que se conoce la temperatura de agua de alimentación del VC de $N=1$, pero se desconoce la temperatura de salida del primario. Por eso, para realizar el cálculo analítico, la misma debe suponerse. Una vez que se dispone de un valor para la temperatura de salida se resolverá la transferencia térmica para los dos VCs inferiores, o sea, para los VC de $N=1$ y $N=196$ (último VC). Con los resultados que surgen de este balance se puede calcular la transferencia térmica en los dos VCs superiores ($N=2$ y $N-1=195$), y así seguir ascendiendo por el manojó de tubos hasta llegar a los dos VCs superiores (estos serían $N=98$ y $N=99$). De la transferencia térmica en el VC superior de la región izquierda ($N=98$) se calcula la temperatura de entrada del primario y en el VC superior de la región derecha ($N=99$) se calcula la temperatura de salida del primario. Si estas temperaturas son similares (con un error que se considere aceptable), el valor de temperatura supuesto en el VC

izquierdo inferior (N=1) es correcto. Si no es así, este valor debe suponerse una vez más y repetir el proceso descrito.

Para un VC en la región derecha del manajo (de N=99 a N, por ejemplo) se conoce la temperatura de entrada del primario al VC y el título de vapor de entrada del lado secundario, y se desconoce la temperatura de salida del primario y el título de salida del secundario. Para calcular estos datos se utilizará la ecuación (1) y la siguiente:

$$P = w_C \lambda (x_S^C - x_E^C) \quad (2)$$

Donde x_S^C es el título de salida del lado secundario, x_E^C el de entrada, w_C el caudal del secundario y λ el calor de vaporización. Una vez que se resolvió la transferencia térmica en el VC (y se calculó la temperatura de salida del primario y el título de salida) se pueden usar estos datos en el VC inmediatamente superior.

Para un VC en la región izquierda del manajo de tubos se conoce la temperatura de salida del primario y el título de vapor de entrada del lado secundario, y se desconoce la temperatura de entrada del primario y el título de salida del secundario. Una vez que se calcularon la temperatura de salida del primario y el título de salida del secundario se pueden usar estos datos en el VC inmediatamente superior. Para calcular estos datos se utilizarán las mismas ecuaciones que para la región derecha.

En la región derecha el agua del primario se encuentra a mayor temperatura, por lo que la transferencia de calor será mayor que en la otra región. Esto lleva a que la generación de vapor del lado secundario sea mayor en la región de entrada del agua pesada. Sin embargo, por la hipótesis 6, se tomó que el título de vapor en el secundario que entra en dos VCs a la misma altura debe ser el promedio de los dos títulos de vapor que surgen de los VCs inferiores.

La diferencia de entalpía entre los flujo de entrada y de salida será la energía absorbida por el fluido que se encuentra del lado carcasa (agua de alimentación). Dado que se encuentra en ebullición, la energía absorbida se utilizará para aumentar el título de vapor. Por eso, se calcula el aumento del título por absorción de la entalpía del primario y, como se conoce el título de entrada, se determina el de salida, utilizando la ecuación (2).

De este modo se calculan las temperaturas de salida de cada VC y el título de salida del lado carcasa determinándose las condiciones de entrada para el siguiente VC. Se

continúa con el cálculo hasta el número total de VC en que hayan sido divididos el manajo de tubos del GV.

Para realizar este cálculo se consideraron las siguientes excepciones:

1. La transferencia de calor en el precalentador es entre el agua de tubos y el agua de alimentación. Dado que ambos fluidos se encuentran subenfriados, la transferencia de calor es por convección tanto del lado carcasa como del lado tubos.
2. En fin de vida se consideró para el agua del primario, al entrar a tubos, un título de 1,91% (tomado de [2]). Por eso, mientras el agua de tubos se encuentre condensando (o con un título de vapor mayor a cero), se utilizará la correlación de Boyko Krushilin (para condensación). Cuando el fluido condense totalmente se deberá utilizar la correlación de Dittus – Boelter (para convección).

Las correlaciones utilizadas para calcular los coeficientes de transferencia térmica son las siguientes:

1. Principio de vida:

- i. Primario (tubos): Se utilizó la correlación de Dittus - Boelter.

$$h_T = \frac{K}{D_{h,T}} 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (3)$$

- ii. Secundario (carcasa): Se utilizó la correlación de Chen. Los parámetros F y S se obtienen de [20].

$$h_C = h_M F + h_m S \quad (4)$$

$$h_m = 0,00417 p_c^{0,69} q^{0,7} \left[1,8 \left(\frac{p}{p_c} \right)^{0,17} + 4 \left(\frac{p}{p_c} \right)^{1,2} + 10 \left(\frac{p}{p_c} \right)^{10} \right] \frac{K}{D_{h,C}} \quad (5)$$

$$h_M = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \frac{K}{D_{h,C}} \quad (6)$$

2. Fin de vida:

- i. Tubos: Se utilizó la correlación de Boyko – Krushilin para la condensación y la de Dittus – Boelter luego de condensar completamente.

$$h_T = 0,024 \left(\frac{D_i G_{LO}}{\mu_L} \right)^{0,8} Pr_L^{0,43} \left(\frac{(\rho_m/\rho_v)_E^{0,5} + (\rho_m/\rho_v)_S^{0,5}}{2} \right) \frac{K}{D_{h,T}} \quad (7)$$

$$(\rho_m/\rho_v)_E = 1 + \frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} x_E^T \quad (8)$$

$$(\rho_m/\rho_v)_S = 1 + \frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} x_S^T \quad (9)$$

- ii. Carcasa: Se utilizó la misma correlación que de BOL.

Los subíndices L y V representan líquido y vapor, respectivamente. En el precalentador se tomó para ambos lados (tubos y carcasa) la correlación de Dittus – Boelter.

Todas las correlaciones presentadas en este trabajo se encuentran en la referencias [20] y [21].

En primer lugar, deben identificarse las condiciones de contorno del problema o los datos que son impuestos, son:

- Los caudales de refrigerante de lado primario y secundario.
- Condiciones termodinámicas de las corrientes de entrada.

Una vez fijadas dichas condiciones, se calculan las propiedades termodinámicas de las dos corrientes mencionadas. Las propiedades requeridas son:

- Densidad
- Viscosidad
- Conductividad térmica
- Entalpía
- Calor específico
- Calor latente de vaporización (para el lado secundario)

Debe tenerse en cuenta que el agua liviana que sale del precalentador (ubicada la salida de este entre N=168 y N=169) se mezcla con la que sale del N=27. De esta mezcla se calcula el título de salida. Este será el que ingrese a los dos VCs superiores.

Para este cálculo se consideró que toda la potencia que intercambia el lado primario en el VC es transferida al secundario. Este, a su vez, no intercambia calor con la región anular que se encuentra alrededor de la envoltura del manojito de tubos.

Dado que los VCs se tomaron de una altura chica (de aproximadamente 10 cm), la temperatura de entrada y salida del lado tubos son muy cercanas. O sea, no se espera que, para un VC cualquiera, la diferencia de temperatura entre entrada y salida cambie significativamente (de los cálculos se observó que no supera los 2°C). Por eso, se espera que las propiedades termodinámicas no varíen significativamente si para un VC se las calcula con la temperatura de entrada o salida y no a la temperatura de film (como requiere Dittus - Boelter) entre ambas. Por eso, para el cálculo analítico, se calcularon las propiedades termodinámicas utilizando la temperatura de entrada o de salida, según conviniese para cada VC. Proceder de este modo simplifica mucho el cálculo, ya que para un VC siempre se desconoce una de las dos temperaturas, y además se independiza de la temperatura de pared, requerida para calcular la temperatura de film. Por otro lado, del lado secundario la variación de temperatura entre la parte inferior (placa-tubo) y la parte superior, es muy pequeña. Por eso, las propiedades de este lado se tomaron constantes.

Para el agua del lado carcasa en la placa-tubo se tomó agua líquida en estado de saturación. O sea, el título de entrada x_E^C es cero.

A continuación se explica el cálculo realizado:

1. Se calcula el área de transferencia térmica del VC.

$$A = \pi D_o N \Delta L \quad (10)$$

2. La potencia transferida en el VC está dada por la siguiente ecuación (como se verá más adelante, se acopla a la ecuación (1) por medio de P):

$$P = w_T c_{p,T} (T_E - T_S) \quad (11)$$

3. Se determina el valor R_f , generalmente surge de la experiencia operativa de la central o de otras similares. Luego, se calculan h_T y h_C (coeficientes de transferencia de calor). En este punto se plantea la ecuación (1) utilizando en la *DMLT* para un fluido entregando calor sensible (agua pesada del sistema primario) y otro en ebullición (agua liviana del sistema secundario). Así, se llega a la ecuación (12):

$$P = \left(\frac{1}{h_T} + \frac{1}{h_C} + R_f \right)^{-1} A \frac{(T_E - T_S)}{\ln[(T_E - T_C)/(T_S - T_C)]} \quad (12)$$

Igualando (11) y (12) se obtiene una expresión para determinar T_E (temperatura de entrada) o T_S (temperatura de salida). Con esta temperatura se calcula P . Con la presión del lado secundario se obtiene λ y se calcula x_S^C . x_E^C es un dato de entrada. Se obtiene x_S^C según la siguiente expresión, que proviene de (2):

$$x_S^C = x_E^C + \frac{P}{w_C \lambda} \quad (13)$$

4. En este punto se conocen todas las condiciones de salida (temperatura y título) de las corrientes de agua liviana y agua pesada en el VC. Con estos datos se puede pasar al siguiente VC.

En el caso que los VCs contengan corrientes subenfriadas, como ocurre en el precalentador, en lugar de aplicar las expresiones (11) y (12) se debe realizar lo siguiente: La transferencia de calor en el precalentador es entre dos fluidos subenfriados, por lo que las expresiones (11) y (12) deben reemplazarse por las siguientes expresiones, respectivamente.

$$P = \left(\frac{1}{h_T} + \frac{1}{h_C} + R_f \right)^{-1} A \frac{(T_{E,1} - T_{S,p}) - (T_{S,1} - T_{E,p})}{\ln[(T_{E,1} - T_{S,p})/(T_{S,1} - T_{E,p})]} \quad (14)$$

$$w_T c_{p,1} (T_{S,1} - T_{E,1}) = c_{p,p} (T_{S,p} - T_{E,p}) \quad (15)$$

$$P = w_T c_{p,1} (T_{S,1} - T_{E,1}) \quad (16)$$

Utilizando estas tres expresiones se llega a un sistema de dos ecuaciones algebraicas no lineales del cual se obtiene $T_{S,p}$ y $T_{S,1}$.

En EOL al agua del primario, al entrar a tubos, se le estimó un título de 1,91%. Por eso, mientras el agua de tubos se encuentre condensando deben reemplazarse las ecuaciones (11) y (12) por las siguientes, respectivamente:

$$P = \left(\frac{1}{h_T} + \frac{1}{h_C} + R_f \right)^{-1} A(T_E - T_C) \quad (17)$$

$$P = w_T \lambda (x_E^T - x_S^T) \quad (18)$$

De este modo, primero se calcula P por medio de la expresión (17) y luego se despeja x_S^T de (18).

El cálculo analítico se realizó en Microsoft Excel 2010 mediante macros del programa para encontrar ceros de funciones mediante el método de Newton. Para ello se elige un valor inicial y se itera hasta que se encuentre la solución con una precisión establecida por el usuario (10^{-4}). A continuación se presenta un ejemplo de cómo se utilizó la herramienta. Como ejemplo se tomó el precalentador:

Siguiendo el procedimiento arriba descrito se resuelven las ecuaciones (14), (15) y (16), es decir, debe hallarse el cero de:

$$\left(\frac{1}{h_T} + \frac{1}{h_C} + R_f \right)^{-1} A \frac{(T_{E,1} - T_{S,p}) - (T_{S,1} - T_{E,p})}{\ln[(T_{E,1} - T_{S,p})/(T_{S,1} - T_{E,p})]} - w_T c_{p,T} (T_{E,1} - T_{S,1}) = 0 \quad (19)$$

Esta expresión se obtiene reemplazando P de la ecuación (16) en (14). En otra celda se introduce la ecuación (20) habiendo despejado $T_{S,p}$ de (15). Es decir:

$$T_{S,p} = \frac{w_T c_{p,1} (T_{S,1} - T_{E,1})}{w_{FW} \cdot c_{p,p}} + T_{E,p} \quad (20)$$

En suma, el programa varía el valor de $T_{S,1}$ mientras se calcula $T_{S,p}$, satisfaciendo (14), (15) y (16).

3.3. DATOS DE ENTRADA Y DESARROLLO DEL CÁLCULO

Los datos de entrada del cálculo analítico se presentan en la Tabla 1. Estos fueron tomados de las referencias [2] y [22].

Tabla 1: Datos de entrada.

Significado	BOL	EOL	Unidades
Caudal de D ₂ O	2138,8	2073,7	kg/s
Diámetro interior de tubos	0,01362	0,01362	m
Número de tubos	3530	3353	---
Diámetro exterior de tubos	0,01588	0,01588	m
Diámetro hidráulico del precalentador *	0,032	0,032	m
Diámetro hidráulico de la zona opuesta al precalentador *	0,0314	0,0314	m
Diámetro hidráulico de la zona superior al precalentador *	0,0331	0,0331	m
Área de flujo del precalentador *	0,2945	0,2945	m ²
Área de flujo de la zona opuesta al precalentador *	1,4278	1,4278	m ²
Área de flujo de la zona superior al precalentador *	2,9761	2,9761	m ²
Largo de tubos, rama caliente	9,83	9,83	m
Largo de tubos, rama fría	7,16	7,16	m
Largo de tubos, precalentador	2,67	2,67	m
Presión de vapor en el GV	4,695	4,695	MPa
Presión de D ₂ O	9,99	9,98	MPa
Caudal de vapor / agua de FW	258	258	kg/s
Caudal del Downcomer **	1290	1290	kg/s
Temperatura de entrada, lado tubos	309,45	309,89	°C
Título de vapor en la entrada, lado tubos	---	0,0191	---
Factor de ensuciamiento ***	$1,761 \times 10^{-6}$	$5,148 \times 10^{-5}$	m ² °C/W

* Obtenido de la referencia [22].

** En los GVs de las centrales nucleares CANDU 6 se define la recirculación como la relación entre el caudal de agua que desciende por el ánulo y el caudal del agua de alimentación. Por el caudal de 258 kg/s para el agua de alimentación y una recirculación de 5 (tomada de [2]), el caudal de agua del downcomer es de 1290 kg/s.

*** Para el principio de la vida útil de la planta se tomó el R_f de la referencia [2].

Para EOL se tomó un factor de ensuciamiento de $3,05 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{°C/W}$ para el exterior de tubos. Este dato surge de la experiencia operativa de la CNE. Por otro lado, para el interior de tubos se utilizó el ensuciamiento de la referencia [23] y se la

extrapoló linealmente a 30 años (en esta referencia se informa el ensuciamiento en tubos en cinco años). El cálculo se presenta en el anexo de este trabajo.

3.4. EL PROGRAMA TRACE5

El código de sistemas TRACE5 es un programa de computadora que permite simular sistemas de control y procesos para centrales nucleares. Fue desarrollado por el US-NRC (Nuclear Regulatory Commission, Comisión de Regulación Nuclear de los EEUU). El programa está diseñado para realizar análisis determinísticos “best-estimate” de LOCAs, transitorios operacionales y otros accidentes que pueden darse en una central nuclear. Para este trabajo se utilizó TRACE5 patch 4 (versión 5.0) [24] que es la última versión liberada por el desarrollador. El TRACE5 fue desarrollado en lenguaje FORTRAN.

TRACE5 incluye modelos de sistemas de dos fases (con no condensables disueltos), procesos termodinámicos que no están en equilibrio, fenómenos de transferencia térmica, inundación, seguimiento de nivel (level tracking en inglés) y cinética de reactores nucleares. Los modelos de sistemas de TRACE5 son multidimensionales porque los componentes se modelan en distintas dimensiones. Por ejemplo, las cañerías son unidimensionales pero el componente recipiente (vessel en inglés) es tridimensional. Por eso, en este componente se tienen en cuenta las coordenadas radial, axial y azimutal.

Las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen el flujo bifásico y la transferencia de calor son resueltas por medio de métodos numéricos en las llamadas celdas (o en las fronteras de esta). Las ecuaciones de fluidodinámica y de la transferencia de calor son resueltas utilizando métodos semi-implícitos respecto al tiempo y la posición. Esto permite, en cada una de las celdas, sea en el centro de estas o en la frontera, calcular las variables de proceso (caudales, presiones, temperaturas, etcétera), y posteriormente conocer los valores de estas variables. A continuación se presenta una breve explicación de los métodos utilizados por TRACE:

- Método semi-implícito: Este método consta de tres etapas. En la primera se evalúan determinadas propiedades y variables al principio del paso de tiempo, como coeficientes de fricción, conductividad térmica, etc. En la segunda etapa se resuelven las ecuaciones en diferencias finitas, y en la tercera se calculan los datos de otras variables y se cargan los resultados para ser utilizados en el próximo paso de tiempo.

- Método SETS: Este también es un método semi-implícito. Es similar al anterior pero se diferencia en que este introduce pasos correctores, llamados “estabilizadores”.

La descripción detallada de los métodos numéricos del TRACE5 se encuentra fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, para mayor información se puede recurrir al manual de teoría del código [25].

TRACE5 utiliza un enfoque modular de componentes para el modelado del sistema de procesos de una central nuclear. Esto quiere decir que cada cañería, equipo o accesorio del sistema de procesos puede ser representado con algún componente de los que ofrece TRACE5, como cada uno de ellos es independiente de los demás, se puede realizar cambios en uno de ellos sin afectar el resto del código.

Los componentes son nodalizados (separado en celdas de un volumen determinado por el usuario), y en cada volumen se resuelven las ecuaciones de la fluidodinámica y el calor. Los componentes hidráulicos de TRACE5 son tuberías, plenums, presurizadores, canales combustibles (con o sin potencia), bombas, separadores, turbinas, calentadores, válvulas, acumuladores y recipientes de presión.

El programa dispone de estructuras de calor. Estos son elementos que permiten modelar en 2D (utilizando coordenadas cartesianas o cilíndricas) la transferencia térmica por conducción o convección. La transferencia se puede realizar entre dos componentes hidráulicos, establecer un flujo de calor variable o constante en el tiempo para un componente, etc. Cuando en un componente se requiere un determinado flujo de calor, se utiliza una estructura de calor acoplada a un componente llamado “power” (en inglés, potencia, de este modo se lo llamará en adelante). De este modo, utilizando Estructuras de Calor se puede definir el flujo de calor según lo requiera el usuario. En el caso de este trabajo, las estructuras de calor fueron utilizadas para transmitir calor de los componentes del primario al secundario por diferencia de temperatura.

Como ya fue nombrado, TRACE5 permite describir los fenómenos de transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento entre las dos fases (líquido y vapor) y la interacción de estas fases con flujos calóricos. Es por esto que este programa trabaja con las seis ecuaciones de conservación. O sea, plantea las ecuaciones de masa, energía y cantidad de movimiento para cada fase, lo que resulta en un conjunto de seis ecuaciones interrelacionadas. Las interacciones entre las dos fases (por ejemplo, transferencia de calor o de masa del líquido al vapor) que se dan en un determinado componente varían de acuerdo al régimen de flujo en que se encuentre el fluido del

mencionado componente. TRACE5 tiene diferentes regímenes de flujo, como burbujas dispersas en un líquido, flujo tapón o flujo anular. El régimen en que se encuentre el flujo bifásico en un determinado componente se determina por medio de su fracción de vacío y su caudal. Con estos datos, el programa ingresa en un gráfico (que se encuentra en [24]) y obtiene el régimen de flujo. De acuerdo al régimen obtenido, el programa utiliza distintos coeficientes de transferencia de calor interfacial para determinar el calor transferido entre fases.

El enfoque de TRACE5 también es modular respecto a las funciones. Esto quiere decir que los cálculos se realizan en módulos separados. Por ejemplo, el algoritmo de solución de la ecuación hidrodinámica en una dimensión y la selección de coeficientes de transferencia de calor se realizan en rutinas separadas a las que pueden acceder todos los componentes. Esto permite un manejo sencillo del programa cuando se decide cambiar, por ejemplo, una correlación por otra que se considera más adecuada.

El programa TRACE5 tiene ciertas limitaciones, las cuales se presentan a continuación:

1. No es apropiado para modelar situaciones en que la transferencia de cantidad de movimiento juega un rol preponderante en zonas localizadas. Por ejemplo, cuando el perfil de velocidad radial no es plano.
2. TRACE5 por si solo no es recomendable para transitorios en los que hay grandes cambios locales en la potencia del reactor. Por ejemplo, en la eyección de una barra de control. Sin embargo, TRACE5 puede acoplarse al código PARCS de cinética neutrónica tridimensional.
3. Las ecuaciones de masa, energía y cantidad de movimiento suponen que las tensiones cortantes de un fluido son despreciables y que el modelado de la turbulencia no está acoplado a las ecuaciones de conservación (los efectos de la turbulencia en el modelo pueden ser estimados por medio de correlaciones).
4. No tiene en cuenta los efectos del gradiente térmico en el esfuerzo cortante.
5. Generalmente no se tiene en cuenta el calentamiento viscoso dentro del mismo fluido.

A pesar las limitaciones expresadas, el código es utilizado a nivel internacional para simulaciones y análisis de reactores tipo BWR [26] y PWR [27].

Para resolver un problema dado, TRACE5 recibe una entrada de datos en la que se presenta la geometría del sistema que se va a resolver (diámetros hidráulicos y largo

de cañerías, codos, etc.), las condiciones iniciales y de contorno, lazos de control, los equipos de la planta (bombas, separadores, calentadores, etc.), estructuras de calor, los materiales, etc. Una vez ingresados todos los datos de entrada, el código TRACE5 resuelve el sistema de ecuaciones. Para presentar la información de salida, en forma gráfica, se utiliza la herramienta AptPlot. Para más información se puede recurrir a [28]. Con esta herramienta se presenta la evolución de las distintas variables del programa y se las grafica respecto al tiempo.

3.5. MODELADO DEL GENERADOR DE VAPOR POR MEDIO DE TRACE5

Antes de iniciar este trabajo se disponía de un modelo de GV de CNE desarrollado en RELAP5. Este es un programa de simulación de transitorios en centrales nucleares [29]. Es similar al TRACE5 ya que requiere una entrada de datos que describa la geometría de la planta, los equipos y accesorios, lazos de control, etc.

El modelo de GV en el código de sistemas RELAP5 es parte de un trabajo de análisis determinísticos que realizó la ARN para simular la CNE [6] y [7]. RELAP5 y TRACE5 tienen una herramienta llamada SNAP [30] que permite convertir los modelos de RELAP5 y utilizarlos en TRACE5. Esta herramienta es una interfaz gráfica para simplificar el uso de RELAP5 y TRACE5. Con ella se puede armar la entrada de datos utilizando una interfaz gráfica que permite visualizar cada componente y cargar los datos para cada componente. Si no se dispone de ella, los distintos componentes hidráulicos deben ser introducidos en formato texto.

En la Figura 5 se presenta la interfaz de TRACE5. A continuación, explican los distintos elementos de la interfaz mostrada:

- Encuadre en rojo: Navegador, en él se presenta una lista de los componentes hidráulicos, estructuras de calor, sistemas de control y otros elementos importantes del modelo. Es además en este elemento de la interfaz en el que se crean otros componentes como cañerías, separadores, potencias, estructuras de calor, etc. Desde el Navegador también se tiene acceso a la Opciones del Modelo, donde se puede cambiar el tiempo de corrida, los fluidos que se utilizarán, carga y almacenamiento de condiciones de contorno.
- Encuadre en naranja: Propiedades Principales, este elemento de la interfaz de SNAP presenta los parámetros de cada componente (sea hidráulico, estructura de calor, potencia, etc.). Por ejemplo, para una cañería se ingresan los datos geométricos, los coeficientes de fricción para cada celda, sus condiciones iniciales, su rugosidad, etc.

- Encuadre en verde: Vista, en esta sección se representan los distintos lazos de control, componentes hidráulicos y como estos se encuentran conectados.
- Encuadre en azul: Mensajes, presenta mensajes al usuario (por ejemplo, cuando se empieza a correr un programa o se guarda un trabajo). También puede presentar advertencias, como cuando se corre un modelo en el que el programa detectó errores.

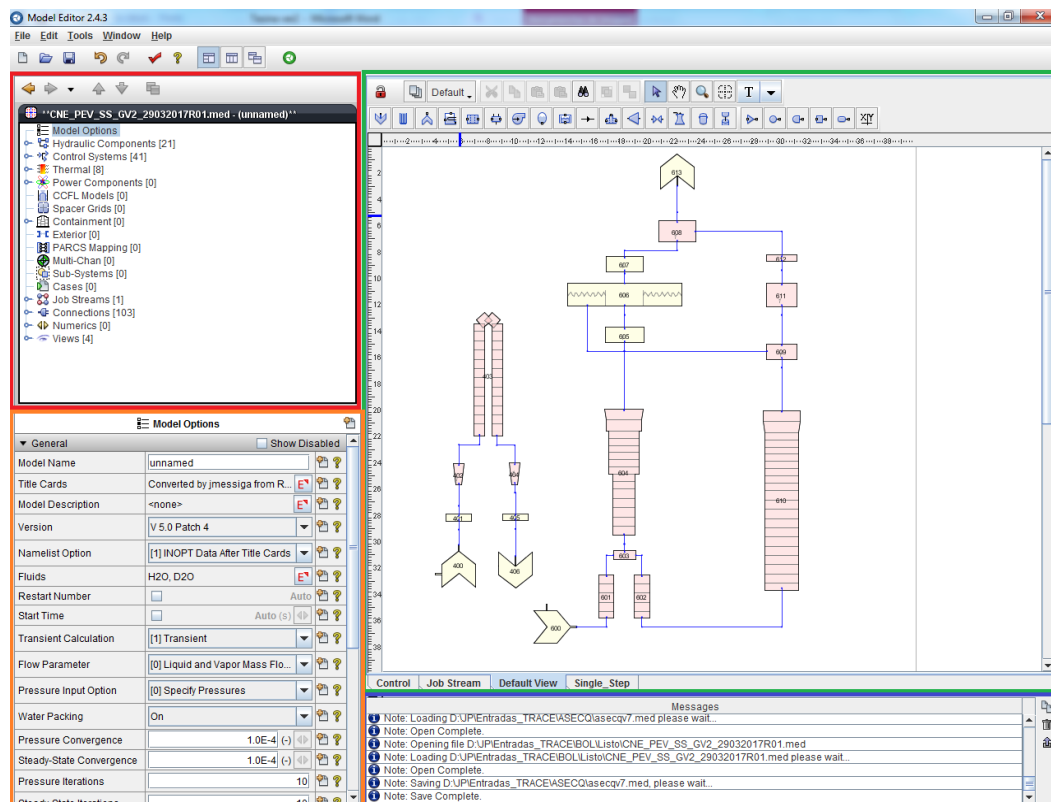


Figura 5: Interfaz del TRACE5 utilizando SNAP.

Así, utilizando SNAP el modelo de GV original en RELAP5 fue convertido a TRACE5. Luego, se revisó la conversión y se adecuó de modo de representar eficazmente el GV. Algunos cambios introducidos fueron:

- Cambios en las condiciones iniciales
- Se agregaron dos lazos de control, uno que regula potencia variando el caudal de entrada del primario y otro que controla el nivel colapsado de agua del downcomer variando el caudal de agua de alimentación
- Se cambiaron los parámetros del separador

En la Figura 6 se presenta el modelo del GV en TRACE5. El recuadro rojo delimita los componentes hidráulicos que pertenecen al primario y el recuadro azul a los componentes del secundario.

Del lado primario se ve la condición de contorno “FILL 400”. Este componente es el que provee el caudal de entrada de agua del primario y sus condiciones termodinámicas de entrada. Este caudal fluye a través de la calota de entrada (PIPE 402), luego pasa por el tubo en U (PIPE 403) que representan los 3530 tubos del GV [2] e intercambian energía calórica con los componentes del secundario. Luego de pasar por los tubos, el caudal del primario pasa por la calota de salida 404 y luego sale del sistema por el BREAK 406. Esta es una condición de contorno que fija la presión de salida de tubos.

Del lado secundario se fija como condición de contorno el caudal de agua de alimentación y su presión y temperatura (FILL 600). Esta agua circula a través del precalentador, modelado como una tubería denominada PIPE 601, y luego se mezcla con el agua que viene de la región anular en el PIPE 603. Luego de la mezcla, el agua asciende por el PIPE 604 hasta el SEPD 606. En este se separa el agua (que desciende al PIPE 609) del vapor (que asciende al PIPE 608 y luego sale del sistema a través del BREAK 613, que fija la presión de salida del vapor). Hay una segunda corriente que sale del separador. Esta desemboca en el PIPE 609 y luego desciende por el ánulo.

Se utilizaron cinco estructuras de calor para este modelo ubicadas en:

1. Las calotas de los GV, las cuales son adiabáticas.
2. Entre el agua pesada de los tubos en U y el agua liviana del lado secundario.
3. Entre el precalentador y el agua del secundario que lo circunda.
4. Entre el agua liviana del secundario que rodea el manojito de tubos y el ánulo.
5. Paredes exteriores del ánulo, que son adiabáticas.

Las estructuras de calor modelan la transferencia de calor entre dos fluidos (como en el caso de 2, 3 y 4), por lo que consideran la convección en ellos, pero también modelan la conducción del calor en el metal. Por eso, las estructuras de calor requieren que se les especifiquen los materiales a través de los cuales se transmite el calor. Por ejemplo, para las estructuras 1 y 2 se utilizó el material ASTM B163, y para las estructuras 3 y 4 se usó ASME SA106. Las propiedades de ambos se encuentran cargados en TRACE5.

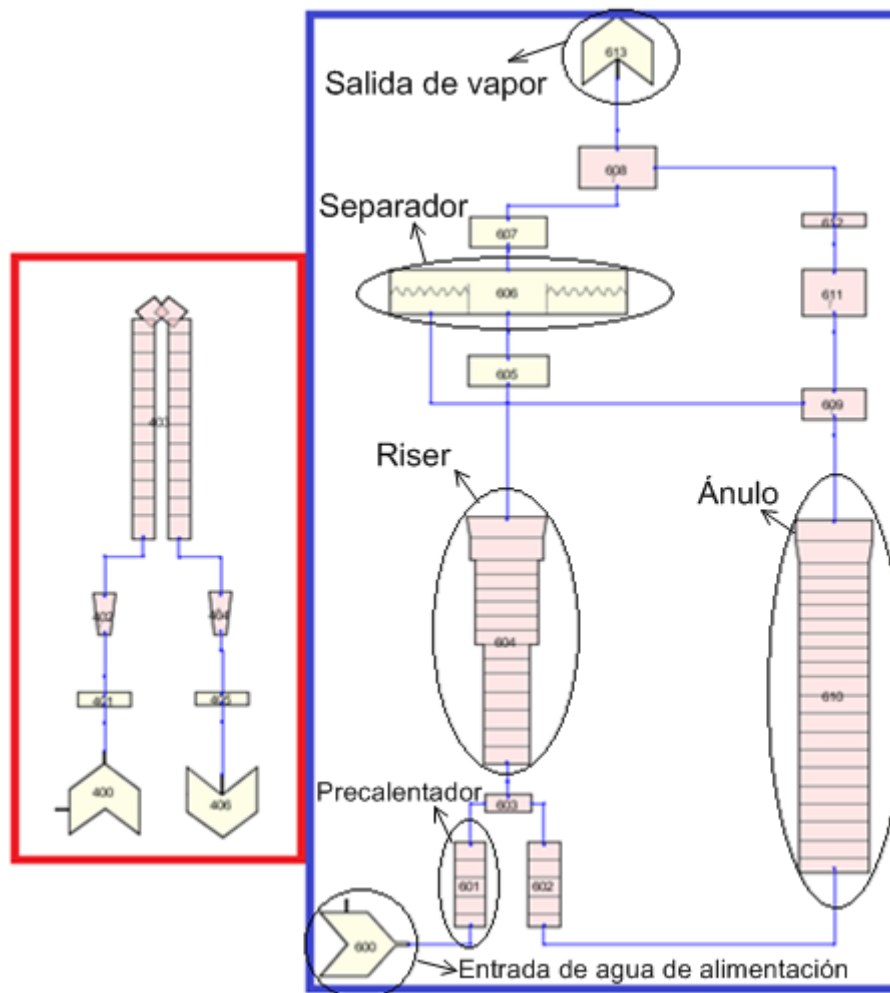


Figura 6: Modelo del GV de CNE en TRACE5. El recuadro rojo delimita el lado primario y el azul el secundario.

A continuación, se presenta la Tabla 2. En ella se presentan los distintos componentes hidráulicos del modelo del GV.

Tabla 2: Significado de cada componente del modelo de TRACE5.

Numeración	Componente hidráulico utilizado	Descripción del componente hidráulico
400	FILL	Caudal de entrada de agua del primario
401	PIPE (cañería)	Tubería de entrada a la calota de entrada
402	PIPE	Calota de entrada
403	PIPE	Tubos en U
404	PIPE	Calota de salida
405	PIPE	Tubería de salida de la calota de salida
406	BREAK	Salida de agua del primario
600	FILL	Entrada de agua de alimentación al GV
601	PIPE	Precalentador
602	PIPE	Zona lindera con el precalentador. Por ella circula el agua proveniente de la región anular.
603	PIPE	Zona de mezcla
604	PIPE	"Riser"
605	PIPE	Entrada al Separador
606	SEPD (Separador)	Separador
607	PIPE	Salida del Separador – Vapor
608	PIPE	Salida del GV
609	PIPE	Salida del Separador – Líquido
610	PIPE	Región anular
611	PIPE	Segundo Separador
612	PIPE	Salida Segundo Separador
613	BREAK	Salida de vapor del GV

Como se informa en la Tabla 2, el componente hidráulico 606 es un separador. La función que cumple este componente es separar las dos fases. Se lo tomó como separador ideal (o sea, que el vapor del caudal de entrada se separa totalmente del de agua, ver capítulo 2), por lo que, de la corriente de entrada, el agua líquida cae hacia el componente 609 mientras que hacia el componente 607 asciende el vapor del caudal de entrada del separador.

Condiciones de contorno

Para el modelado del GV se eligieron las siguientes condiciones de contorno:

1. Presión y temperatura de entrada del agua del primario.
2. Presión en la salida de los tubos del lado primario.
3. Presión y temperatura de entrada de agua de alimentación.
4. Presión de salida de vapor.

En la siguiente tabla se presentan los valores de las condiciones de contorno.

Tabla 3: Condiciones de contorno del modelo.

Sistema	Condición de contorno	Presión (bar)	Temperatura (°C)
Primario	1	99,9	309,34
Primario	2	96,1	-
Secundario	3	46,95	187
Secundario	4	46,95	-

Lazos de control

Los lazos de control se utilizan para fijar una variable en un valor deseado. En el caso del modelo del GV, se implementaron dos lazos de control, para regular las siguientes variables de proceso. Los lazos implementados en el modelo de GV de TRACE5 se presentan a continuación:

- **Potencia.** Este lazo de control varía el caudal de agua del primario para regular la potencia intercambiada. En la Figura 7 se observa que el lazo de control varía el caudal en función de la potencia del GV.

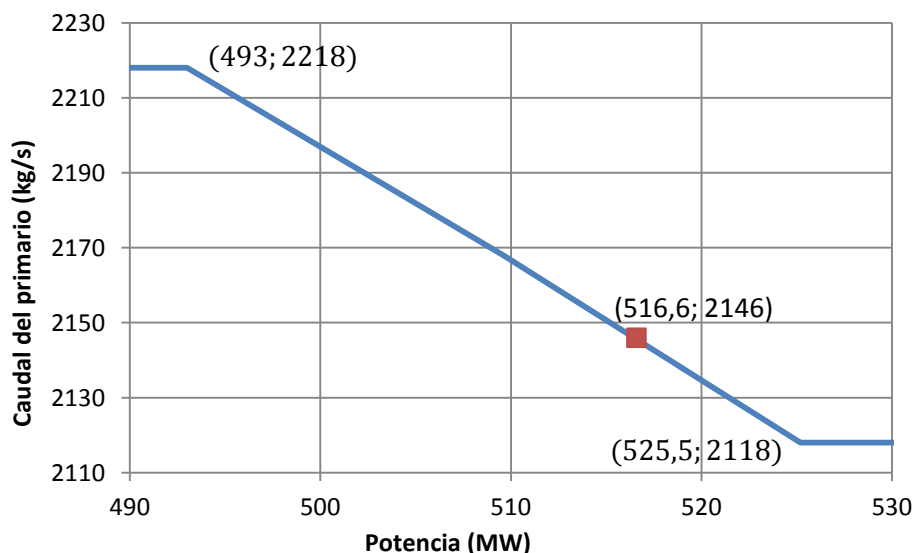


Figura 7: Lazo de control de la potencia del GV para BOL. El punto rojo es el punto de operación (ver capítulo 4).

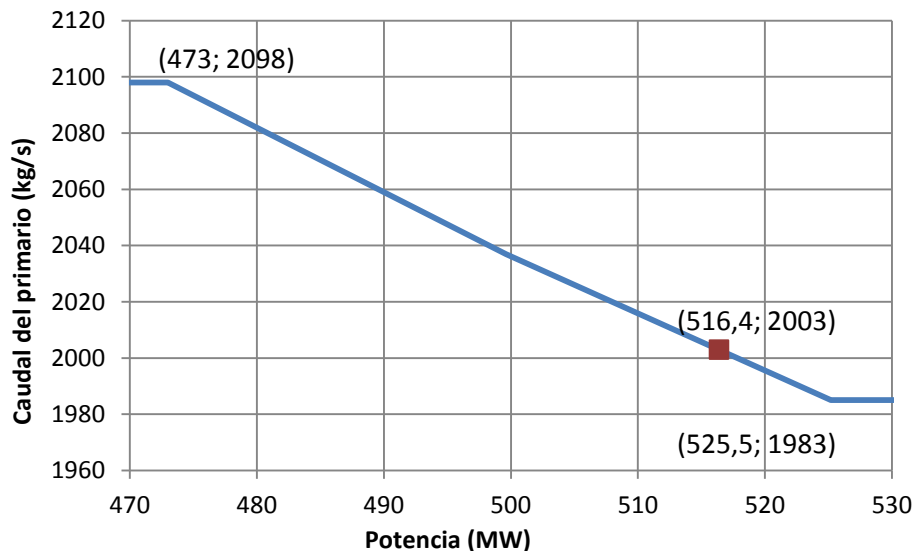


Figura 8: Lazo de control de la potencia del GV para EOL. El punto rojo es el punto de operación (ver capítulo 4).

- Nivel colapsado en el ánulo. En esta zona del GV hay una mezcla de agua y vapor. El nivel colapsado surge de extraer el volumen ocupado por el vapor y medir el nivel del agua líquida desde la parte inferior del ánulo hasta la parte superior de este. En este lazo de control se varía el caudal de agua de alimentación para regular el nivel colapsado del downcomer. En la Figura 9 se observa como el lazo de control varía el caudal en función del nivel. El punto de operación para BOL se indica en rojo y para fin de vida en verde.

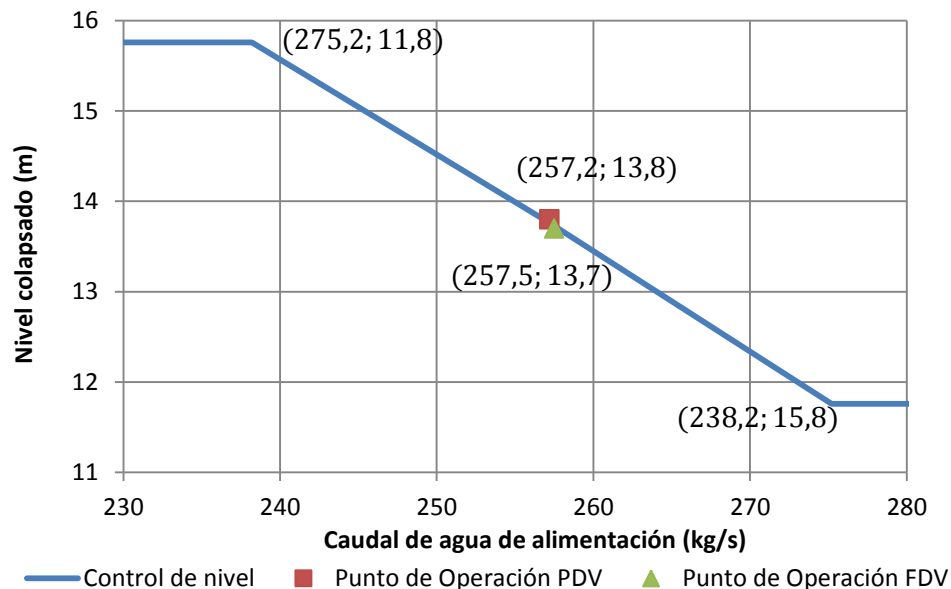


Figura 9: Lazo de control del nivel colapsado. Los puntos rojo y verde representan los puntos de operación en principio y fin de vida (ver capítulo 4).

Debe tenerse en cuenta que estos lazos de control difieren del control de nivel de la CNE, el cual fue brevemente descrito en el capítulo 2. Además, los lazos no tienen zonas muertas, las cuales son un rango en el que, si entra la variable controlada, el control deja de actuar hasta que esta no salga de dicho rango. Por ejemplo, si la zona muerta del nivel colapsado es entre 13 y 14 metros, y el nivel inicialmente se encuentra en 12 metros, el control de planta aumentará el caudal de agua de alimentación para aumentar el nivel. Al llegar este a 13 metros, aproximadamente, el control dejará de actuar y el caudal de agua de alimentación se mantendrá constante.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. RESULTADOS

En este capítulo se analizan y comparan los resultados del modelo de TRACE5 y del cálculo analítico, con los valores de [2]. Debe tenerse en cuenta que los resultados del cálculo analítico sirven como aproximación de los resultados obtenidos por medio de TRACE5. Estos últimos son los que permiten una verificación más precisa de la transferencia de calor en los GVs, ya que considera fenómenos que no son tenidos en cuenta en el cálculo analítico, especialmente en doble fase. Los resultados de TRACE5, el cálculo analítico y de la referencia [2] se volcaron en la Tabla 4 para BOL y en la Tabla 5 para EOL.

Con el modelo de TRACE5 se realizó una corrida para BOL. Esta consiste en fijar las condiciones iniciales al problema y dejar que el mismo corra hasta alcanzar un estado estacionario. Los resultados de la corrida se presentan en las figuras de este capítulo.



Como se observa en la Figura 10, en el modelo de GV de TRACE5 los tubos en U tienen veintiséis celdas. En la Figura 10 se presenta la evolución temporal de la temperatura en las celdas 1 (entrada de agua del primario), 6, 11, 16, 21 y 26 (salida de agua del primario). En esta figura se observa que, con las condiciones iniciales fijadas, se alcanza rápidamente el estado estacionario. Además, se grafica en línea punteada el valor de consigna para la temperatura de salida. Se observa que ambas coinciden.

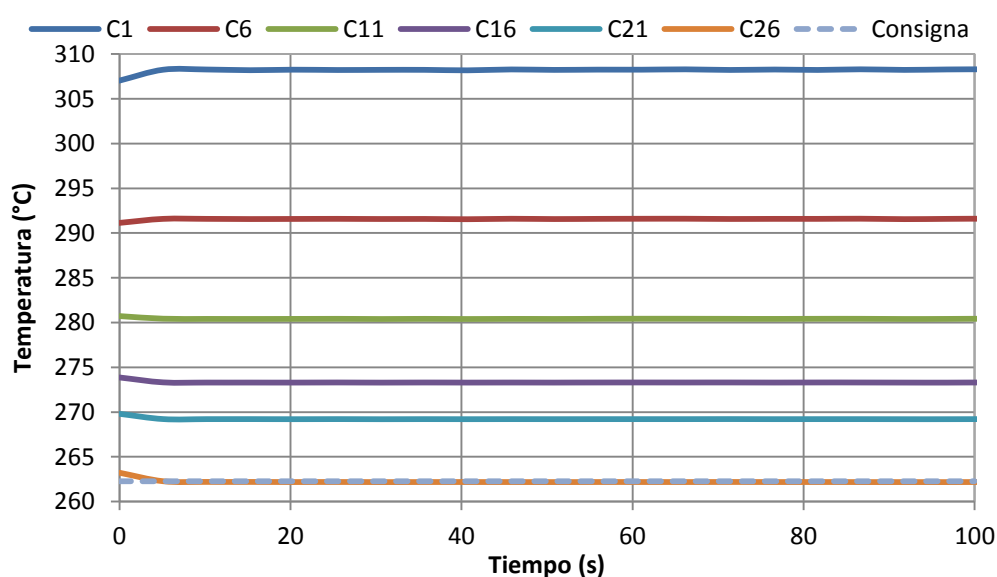


Figura 10: Evolución temporal de la temperatura del líquido en los tubos en U, celdas 1, 6, 11, 16, 21 y 26.

En las dos figuras siguientes presentan el nivel, la recirculación y la presión del vapor a la salida del GV. En estas dos figuras se observa que estas variables alcanzan rápidamente un estado estacionario, como era de esperarse.

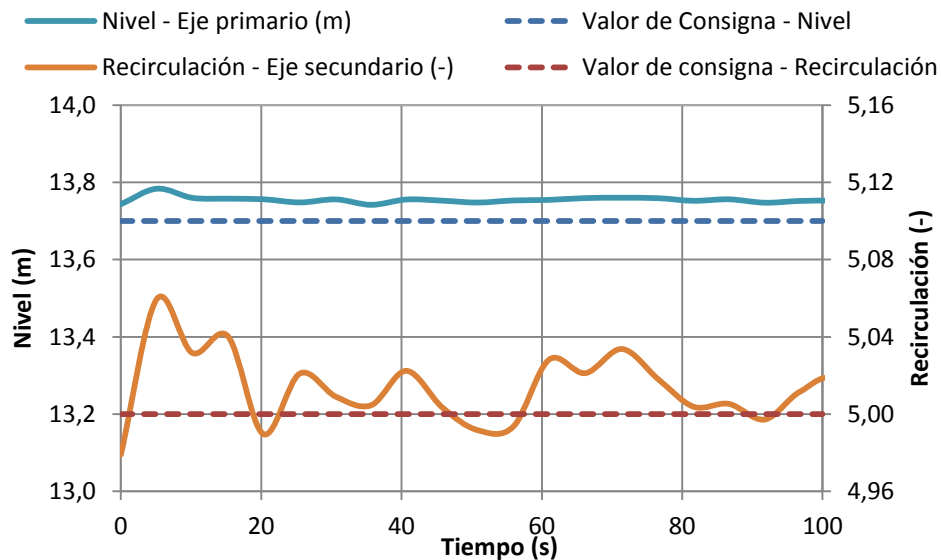


Figura 11: Nivel y Recirculación en el secundario.

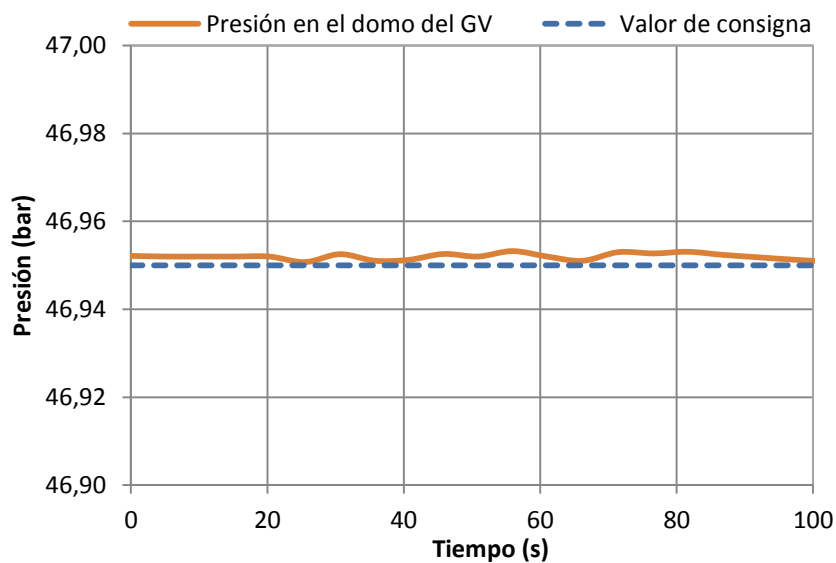


Figura 12: Presión en el domo del GV.

En [2] se realizó una simulación del primario y los nuevos GVs como parte del PEV de la CNE con el código NUCIRC 2.2.1, MOD2.002R1. Este trabajo tenía como objetivo simular las condiciones de operación, para principio y fin de vida, cuando la planta operase a plena potencia, con los GVs nuevos. Para eso, se simuló el reactor, uno de los dos circuitos del sistema primario, dos bombas y dos de los GVs nuevos. Para la condición de operación en EOL se tomó un factor de ensuciamiento que incluye,

también, el taponamiento de tubos. También se modeló las bombas del sistema primario con una curva característica. En [2] se presentan los resultados, por lo que en este trabajo se tomó los que se consideran más importantes y se los comparó con los obtenidos por medio del cálculo analítico y el modelo de TRACE5.

En la siguiente tabla se presenta la comparación de estos parámetros. Al analizar esta tabla debe tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

- En el cálculo analítico se fijó la recirculación, el caudal del primario y el caudal de agua de alimentación. Por eso, para el cálculo analítico, no se calcula la diferencia porcentual de estos parámetros.
- En el cálculo analítico no se tuvo en cuenta el nivel del downcomer y no se calculó la potencia del lado secundario.
- No se calculó la diferencia porcentual para la temperatura de salida del primario, ya que se calculó el salto térmico.

Tabla 4: Resultados de BOL.

Parámetro	Cálculo del parámetro			Comparación porcentual (%)	
	Diseño	TRACE5	Cálculo analítico	TRACE5	Cálculo Analítico
Nivel DC (m)	14,2	13,8	-	2,8	-
Recirculación (-)	5,0	5,02	5	0,4	-
Potencia Primario (MW)	516,6	516,6	575	0	11,3
Caudal Primario (kg/s)	2128,5	2146	2128,5	0,8	-
Caudal agua de alimentación (kg/s)	258	257,2	258	0,3	-
Temperatura de salida del Primario (°C)	262,3	262,3	256,7	-	-
Salto Térmico (°C)	47,2	47,1	52,9	0,2	12,0
Potencia Secundario (MW)	-	509,5	-	-	-
Caudal de vapor (kg/s)	258	255,4	-	1,0	-

En [2] también se realizó una simulación para EOL. Por eso, se adaptó la simulación realizada por TRACE5 para representar el EOL de los GVs y se calculó analíticamente como para BOL. Los cambios introducidos fueron los siguientes:

- Para el cálculo analítico se redujo la cantidad de tubos en un 5% (este dato surge de la experiencia operativa de CNE) y se extrapoló el coeficiente de ensuciamiento según se informa en el Anexo de este trabajo.

- Para el modelo de TRACE5 se redujo en 5% la cantidad de tubos. No se implementó ensuciamiento para este modelo, esto queda para tareas futuras.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla. Del mismo modo que en el caso anterior, aplican las mismas observaciones:

- En el cálculo analítico se fijó la recirculación, el caudal del primario y el caudal de agua de alimentación. Por eso, para el cálculo analítico, no se calcula la diferencia porcentual de estos parámetros. Además, tampoco se tuvo en cuenta el nivel del downcomer, y la potencia del lado secundario no se la calculó.
- No se tuvo en cuenta el salto térmico porque en el caso de EOL el agua entra con un título de vapor.

Tabla 5: Resultados de EOL.

Parámetro	Cálculo del parámetro			Comparación porcentual (%)	
	Diseño	TRACE5	Cálculo analítico	TRACE5	Cálculo Analítico
Nivel DC (m)	14,2	13,7	-	3,5	-
Recirculación (-)	5	4,98	5	0,4	-
Potencia Primario (MW)	516,4	516,4	523	0	1,3
Caudal Primario (kg/s)	2064	2003	2064	3,0	-
Caudal agua de alimentación (kg/s)	258	257,5	258	0,2	-
Potencia Secundario (MW)	-	514,6	-	-	-
Caudal de vapor (kg/s)	258	257,2	-	0,3	-

Observando los resultados de las dos últimas tablas se observa que los resultados son similares a los obtenidos en [2], tanto para principio como para EOL. Por otro lado, el cálculo analítico presenta errores que pueden llegar al 12%.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una simulación de los nuevos GVs por medio del programa TRACE5. Los resultados obtenidos por medio de esta simulación (potencia transferida entre el primario y secundario, recirculación, caudales, etc.) son muy similares a los obtenidos en [2], donde se utilizó el código NUCIRC. De esto se concluye que, analizando los resultados del modelado en TRACE5, los nuevos GVs pueden extraer su potencia nominal, que corresponde a 516,6 MW. Por otro lado, los resultados del cálculo analítico difieren hasta 12% respecto a los de [2]. Por eso, este cálculo sirve como base para el modelo de TRACE5, si bien los resultados se apartan alrededor del 12% de lo esperado, dentro de las simplificaciones realizadas son aceptables. Por medio de este cálculo se obtuvieron potencias del primario al secundario superiores a 516,6 MW, lo que refuerza la hipótesis de que el GV es capaz de extraer su potencia nominal.

Los resultados obtenidos en TRACE5 son consistentes con lo que se esperaba. En la Figura 10 se observó como la diferencia de temperatura entre dos celdas contiguas es

menor a medida que el agua el primario circula por el manojó de tubos. Además, con las condiciones iniciales tomadas se observa que el estado estacionario se alcanza en pocos minutos.

Si bien los resultados del modelo en TRACE5 se corresponden satisfactoriamente con los de [2], para EOL se detectaron algunas oscilaciones en algunas variables de proceso, como la potencia de los GVs o el caudal del primario (Fill 400, controlado por potencia). Para corregir esto se puede incluir un filtro pasabajos (este tiene la función de suavizar los cambios en las variables controladas, dejando pasar las frecuencias más bajas y capturando las altas, que originan mayores oscilaciones) al control del GV (como ya fue mencionado antes), que, además de ser más realista, suavizaría los cambios en las variables tales como la potencia del GV o la recirculación. También pueden introducirse zonas muertas, como ya fue mencionado en el capítulo 3.

La temperatura de salida para principio y fin de vida es la misma, cuando se esperaba que en fin de vida la temperatura sea mayor (ya que tiene título de entrada, a diferencia de en principio de vida). Para corregir esto se puede establecer un nuevo punto de operación con un nuevo control, lo cual queda para tareas futuras. Este caudal del primario debe ser mayor al que figura en el capítulo 4 para fin de vida.

En el modelo de TRACE5 para EOL se tapó el 5% de tubos. Sin embargo, no se agregó ensuciamiento interior y exterior de tubos. Por eso, se plantea como siguiente tarea modelar este ensuciamiento con el 5% de tubos tapados.

5.2. REFERENCIAS

- [1]. <http://www.snclavalin.com/en/point-lepreau-nuclear-generating-station>
- [2]. Embalse Replacement Steam Generator Steady State Operating Conditions at Beginning of Life and End of Life. 18RF – 33111 – ASD – 001. L. Obrutsky, R. Lakhan, M. Yetisir, B. Lepine. 10/01/2008.
- [3]. Determinación de la Velocidad de Corrosión Asistida por Flujo (FAC) en Zonas de Cambio de Dirección en tuberías de Transporte de Hidrocarburos para el Acero API 5L X65 – Vela Lopez, J. E., Diaz, M., Dominguez Aguilar, M.A. Año 2016. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.
- [4]. Programa de Mantenimiento de los Generadores de Vapor de las Centrales de Agua a Presión – Vidal Capó, J., Tapia, C.
- [5]. Evaluación de Vida: Generadores de Vapor – Ranalli, J. M. – Luna, P. – Díaz, G. – Sainz, R. Revisión 0. Informe GPEV-EV-03. Junio 2006.
- [6]. Modelo de la CNE con RELAP5: Rotura de la línea de vapor dentro de la contención – Lazarte, A.I., Corzo, S.F., Schiliuk, N. Asociación Argentina de Tecnología Nuclear.
- [7]. Modelo de la CNE con RELAP5: Pérdida de refrigerante, rotura del 2,5% del área de un colector de entrada – Guala M.V., Lazarte, A. I., Ugarte, R. Asociación Argentina de Tecnología Nuclear.
- [8]. Página oficial de Canteach: <https://canteach.candu.org/>
- [9]. Informe Final de Seguridad – Capítulo 4: El reactor – Año 1993.
- [10]. Manual de diseño: Sistema de Control de Presión e Inventario del SPTC – Central Nuclear Embalse – DM-18-33300/633330.
- [11]. Informe Final de Seguridad – Capítulo 5: Sistemas de Proceso del Reactor – Año 2015. Sablayrolles, A., Maradei, C., Schroeter, F. Documento técnico RN IFS CNE ITC 004.
- [12]. Informe Final de Seguridad – Capítulo 6: Sistemas de Seguridad – Año 1993.

- [13]. Procesos de Transferencia de calor – Donald Kern. Trigésima tercera edición, Compañía Editorial Continental. Año 2001.
- [14]. Desarrollo de un Modelo para Licenciamiento y Estudios de Seguridad Nuclear de la Central Nuclear Embalse empleando Códigos Termohidráulicos – Cavalieri, F. - Ramajo, D. – Schiliuk, N. – Cardona, A. Informe 7/00.
- [15]. ARRGT of Steam Generator – 18 – 33111 – 9001 – 1 – GA – Rev4.
- [16]. Diseño y Cálculo de Recipientes Sujetos a Presión – Estrada, J.M. Edición 2001.
- [17]. Los Materiales de Construcción de los Generadores de Vapor y la Química del Agua en las Centrales Nucleares - Rudelli, M.D. – Informe CNEA, 452. Buenos Aires, 1979.
- [18]. Conversación con personal de ARN sobre la inspección realizada en 2013.
- [19]. Modelado de las Vibraciones de un Arreglo de Tubos Elasticamente montados Inmersos en un Flujo Compresible Utilizando Adaptatividad *hp* – Autor: Piracés, J.M. – Director: Padra, C. – Co-Director: Scheble, M. Junio de 2011. División Mecánica Computacional, Instituto Balseiro.
- [20]. Heat Transfer Handbook – A. Bejan. Editorial John Wiley & Sons, Inc. Año 2003.
- [21]. Transferencia de calor en Ingeniería de Procesos – E. Cao. Cuarta edición, Año 2014. Editorial La Nueva Librería.
- [22]. Full-Circuit Cathena Model for Embalse – Embalse Life Extension Project, 18RF-03500-AR-005. Revisión 3. Candu Analysis Report. Rouben, D. Ross, B. Cormier, M. A.
- [23]. Inner Diameter SG Tube Cleaning with the SIVABLAST Process. Georg Kraemer – Christoph Stepani
- [24]. TRACE V5.0 User's Manual – Volúmenes 1 y 2. Division of System Analysis. U.S. NRC. Año 2008.
- [25]. TRACE V5.0 Theory Manual. Division of System Analysis. U.S. NRC. Año 2008.

- [26]. TRACE/FRAPTRAN analysis of Kuosheng (BWR/6) Nuclear Power Plant for the similar Fukushima accident – Wang, J. Lin, H. Chen, H. Yang, J. Shih, Ch. 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10). Año 2014.
- [27]. Trace Modeling and It's Verification Using Maanshan PWR Start-Up Tests - Wang, J. Lin, H. Cheng, Y. Shih, Ch. Annals Of Nuclear Energy. Año 2009.
- [28]. Página oficial de SNAP: www.snaphome.com/aptpplot
- [29]. RELAP5/MOD3: Code Manual – Vol. 5, Rev. 1. Division of System Analysis. U.S. NRC. Año 1995.
- [30]. Página oficial de SNAP: www.snaphome.com/snap
- [31]. Concentration Processes ender Tubesheer Sludge Piles in Nuclear Steam Generators – Gonzalez, F. – Spekkens, P. Nuclear Journal of Canada. Año 1987.

ANEXO

CÁLCULO DEL ENSUCIAMIENTO PARA EL CÁLCULO ANALÍTICO

Como ya fue mencionado en el capítulo 2, a medida que la central nuclear opera, el GV se ensucia tanto del lado interno de tubos como en las paredes externas de estos y los internos del secundario. La suciedad se debe principalmente a depósitos de magnetita. Sin embargo, puede encontrarse hierro, cobre, cloruros, sulfatos, etc., ver referencia [31].

Dado que la composición química del agua del primario se encuentra fuertemente controlada, del lado secundario se produce más depósito de impurezas. Sin embargo, las impurezas, mayoritariamente magnetita, depositadas tanto de lado primario como del secundario, llevan al deterioro de los tubos y otros internos del GV.



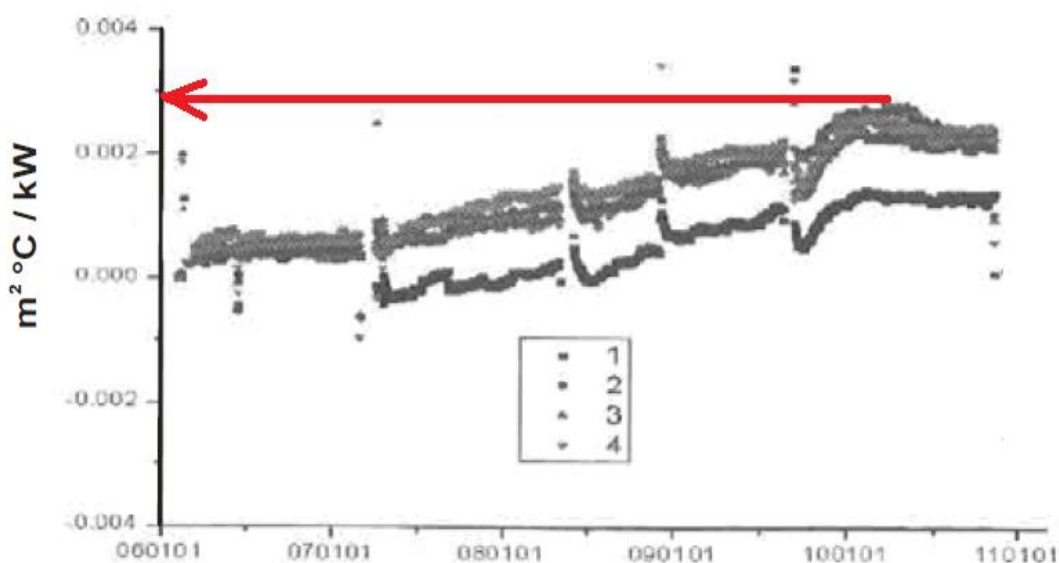
El agua de alimentación al GV tiene un elevado grado de pureza. Sin embargo, durante el proceso de ebullición las impurezas no volátiles son dejadas atrás, en las paredes e internos del equipo, por lo que se acumulan. Por eso, el agua de alimentación tiene un grado de pureza muy superior al del interior del GV.

El mayor inconveniente de las impurezas es que estas se acumulan en las zonas de difícil acceso del agua. Cuando en una zona del GV se produce vapor, este lugar es rápidamente ocupado por el agua líquida. Así, las impurezas no volátiles pasan a esta masa de agua. Sin embargo, cuando el cambio de fase se produce en una zona de difícil acceso al agua, por lo que la concentración de impurezas en esa zona aumenta.

Dado que a medida que transcurre la vida útil de la planta el ensuciamiento actúa como una resistencia térmica adicional, este debe ser considerado en el cálculo de transferencia térmica, ecuación (1). Dado que se acumulan impurezas en ambos lados del equipo, el factor de ensuciamiento se separa en R_{fi} para tubos y R_{fo} para carcasa. El factor R_f de la ecuación (1) se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$R_f = R_{fi} \cdot \frac{D_o}{D_i} + R_{fo}$$

Para el factor de ensuciamiento en carcasa R_{fo} se tomó un valor de $3,05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$. Para calcular el factor R_{fi} se recurrió al gráfico de la referencia [23], que presenta valores de ensuciamiento en el interior de tubos respecto al tiempo:



De este se observa que al cabo de cinco años el valor máximo de ensuciamiento es de $3,10^{-6} m^2.°C/W$. Haciendo una extrapolación lineal a treinta años de vida útil de la central, el ensuciamiento resulta de $1,8.10^{-5} m^2.°C/W$. El factor de ensuciamiento total se calcula con la siguiente expresión:

Así, el R_f resulta de $5,146.10^{-5} m^2.°C/W$. El ensuciamiento en tubos se encuentra sobreestimado ya que en el cálculo se consideró que en tubos el ensuciamiento es $3.10^{-6} m^2.°C/W$ para los treinta años de vida útil, cuando este valor corresponde al último año de operación.