

Aplicación de la Teoría de Perturbación – Método Diferencial- al Análisis de Sensibilidad en Generadores de Vapor de Centrales Nucleares PWR-Caso Angra I

Application of the Perturbation Theory- Differential Method- to Sensibility Análisis in PWR Nuclear Power Plant Steam Generator- Angra I

Giol Sanders R.¹, Andrade de Lima F.², Marques A.², Gallardo A.¹, Bruna M.¹, Zúñiga A

¹ Institución Peruano de Energía Nuclear

² Universidad Federal de Rio De Janeiro-Brasil

RESUMEN

En este trabajo basado en la tesis del Magíster Roberto Giol S. [1] presenta una aplicación del formalismo diferencial de la teoría de perturbación a un modelo termo-hidráulico homogéneo de simulación del comportamiento estacionario de uno de los generadores de vapor de la Central Nuclear tipo PWR Angra I del Brasil. Se desarrolla un programa de cálculo PERGEVAP tomando como base el código GEVAP de Souza[2]. El programa PERGEVAP permite realizar cálculos de sensibilidad de funcionales lineales (temperatura media del primario) y no lineales (flujo de calor medio a través de las paredes de los tubos del generador) con relación a las variaciones de ciertos parámetros termo-hidráulicos (flujo másico del primario, calor específico, etc). Los resultados obtenidos con este formalismo son luego comparados con los obtenidos del cálculo directo con el propio código GEVAP, pudiéndose verificar una excelente concordancia. Este método se muestra promisorio para efectuar cálculos repetitivos asociados al diseño y análisis de Seguridad de los componentes de las Centrales Nucleares.

Descriptores: *teoría de perturbación, método diferencial, sensibilidad, generador de vapor, central nuclear PWR*

ABSTRACT

This report presents an application of the differential approach of the perturbation theory to an homogeneous model of a PWR steam generator in the Angra 1 Nuclear Power Plan in Brazil under steady-state conditions. Program PERGEVAP was built from the code GEVAP developed by Souza and allows sensitivity calculations of linear (average primary loop temperature) and non-linear (average heat flux) functionals due to variations in some thermo-hydraulics parameters (flow rate, specific heat, , etc). Results obtained with this approach are then compared with direct calculations performed using the GEVAP code, with excellent agreements. The method has good potential to treat repeated calculations needed in the design and safety analysis of the Nuclear Plant components.

Keywords: *perturbation theory, differential method, steam generator, PWR nuclear Power Plant*

INTRODUCCIÓN

Aplicar la teoría de perturbación- Formalismo Diferencial- a un modelo homogéneo simplificado que simula el comportamiento estacionario de un generador de vapor de la Central

Nuclear Angra 1 del Brasil, para efectuar un análisis de Sensibilidad de ciertos funcionales relevantes: lineal (temperatura media del refrigerante primario) y no lineal (flujo de calor) con relación a algunos parámetros termo-

hidráulicos de interés y durante el régimen estacionario de operación de la Central Nuclear.

DESCRIPCIÓN DEL FORMALISMO DIFERENCIAL

En este método se plantea tres tipos de ecuaciones:

- Ecuaciones directas.
- Ecuaciones Derivadas.
- Ecuaciones adjuntas.

El Problema Directo

Considere el problema general de un sistema de K ecuaciones no-lineales acopladas. Puede escribirse este sistema formalmente como:

$$\bar{m} \equiv \bar{m}(\vec{f}, \vec{p}, \vec{r}) \equiv [m_1, m_2, \dots, m_k]^t = \vec{0} \tag{1}$$

en toda la región del espacio de fase y en donde \bar{m} incluye en general operaciones con relación a las variables del espacio de fase.

El vector de las variables de estado, o campo:

$$\vec{f} \equiv \vec{f}(\vec{p}, \vec{r}) \equiv [f_1, f_2, \dots, f_k]^t \tag{2}$$

es una función del vector de posición en el espacio de fase:

$$\vec{r} \equiv [r_1, r_2, \dots, r_j]^t \tag{3}$$

(Todos los vectores columna son escritos horizontalmente por cuestión de conveniencia solamente)

Y del vector de parámetros de entrada $\vec{p}(\vec{r})$:

$$\vec{p} \equiv \vec{p}(\vec{r}) \equiv [p_1, p_2, \dots, p_1]^t$$

Las componentes m_i ($i = 1, 2, \dots, K$) son funciones no lineales de \vec{f} y del vector de los parámetros de entrada, $\vec{p}(\vec{r})$ que describen totalmente el sistema. Este sistema de ecuaciones representa las *ecuaciones directas*. Las condiciones de contorno del sistema (1) son escritas formalmente como:

$$\vec{C} \equiv \vec{C}(\vec{f}, \vec{p}, \vec{r}) = \vec{0} \text{ (en } \vec{r} = \vec{r}_c \text{)} \tag{5}$$

donde:

Los vectores \bar{m} y \vec{C} incluyen en general las ecuaciones que relacionan a las variables de estado, los parámetros de entrada y las variables independientes contenidas en el vector de posición en el espacio de fase.

El Problema Derivado

Expandiendo la ecuación perturbada (aquí denotada con el símbolo \bar{m}'), es decir:

$$\bar{m}'(\vec{f}', \vec{p}', \vec{r}') = \vec{0} \tag{6}$$

alrededor de una solución de referencia de \vec{f} (unívocamente determinada dado que los parámetros p_i son conocidos) hasta el primer orden, se obtiene:

$$\begin{aligned} \delta \bar{m} &= \bar{m}'(\vec{f}', \vec{p}', \vec{r}') - \bar{m}(\vec{f}, \vec{p}, \vec{r}) = \sum_{i=1}^I \delta p_i \frac{d\bar{m}}{dp_i} \\ &= \delta p_i \left[\frac{\partial \bar{m}}{\partial p_i} + H \frac{\partial \vec{f}}{\partial p_i} \right] = \vec{0} \end{aligned} \tag{7}$$

Donde H es un operador matricial Jacobiano dado por:

$$H = \frac{\partial \bar{m}}{\partial \vec{f}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial m_1}{\partial f_1} & \frac{\partial m_1}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial m_1}{\partial f_k} \\ \frac{\partial m_2}{\partial f_1} & \frac{\partial m_2}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial m_2}{\partial f_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial m_k}{\partial f_1} & \frac{\partial m_k}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial m_k}{\partial f_k} \end{bmatrix}$$

y $\frac{\partial}{\partial f_i}$ denota una derivada de Frechet (8)

Dado que las perturbaciones δp_i (admitidas independientes) son arbitrarias, es necesario para que se cumpla la ecuación (7) que:

$$\left[\frac{\partial \bar{m}}{\partial p_i} + H \frac{\partial \vec{f}}{\partial p_i} \right] = \vec{0}$$

O lo que es lo mismo:

$$H \vec{f} / p_i = \vec{S}(p_i) \tag{9}$$

Esta expresión constituye el *sistema de ecuaciones derivadas* donde:

$$H = \frac{\partial \bar{m}}{\partial \vec{f}} \quad \vec{f} / p_i = \frac{\partial \vec{f}}{\partial p_i} \quad \vec{S}(p_i) = - \frac{\partial \bar{m}}{\partial p_i} \tag{10}$$

Las condiciones de borde para las ecuaciones derivadas [ecuación(9)] se obtienen derivando la expresión (5) obteniéndose:

$$\frac{\partial C}{\partial p_i} + \frac{\partial \vec{C}}{\partial \vec{f}} \cdot \frac{\partial \vec{f}}{\partial p_i} = 0 \text{ (en } \vec{r} = \vec{r}_c \text{)} \tag{11}$$

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EL FUNCIONAL DE RESPUESTA

Considere un funcional respuesta R definido por:

$$R = \langle \alpha T_1 + \beta \rangle \quad (12)$$

donde:

S^+ es una función conocida y la integración es realizada en todo el espacio de fase.

Se desea calcular la variación δR resultante de las perturbaciones δp_i ($i = 1, 2, \dots, N$) de los parámetros del sistema.

El análisis de sensibilidad consiste en evaluar la variación δR resultante de las perturbaciones δp_i ($i = 1, 2, \dots, l$) en algunos o todos los parámetros del sistema.

La variación de R obtenida a partir de la ecuación (12), está dada por:

$$\delta R = \sum_{i=1}^l \delta p_i [\langle \vec{f} \cdot \vec{S}^+ / p_i \rangle + \langle \vec{f} / p_i \cdot \vec{S}^+ \rangle] \quad (13)$$

donde:

$$\vec{S}^+ / p_i = \frac{\partial \vec{S}^+}{\partial p_i} \quad (14)$$

$$\vec{f} / p_i = \frac{\partial \vec{f}}{\partial p_i} \quad (15)$$

Para obtener δR es necesario evaluar \vec{f} / p_i

El coeficiente de sensibilidad relativo a un dado parámetro "pi" del sistema resulta:

$$\frac{\delta R}{\delta p_i} = [\langle \vec{f} \cdot \vec{S}^+ / p_i \rangle + \langle \vec{f} / p_i \cdot \vec{S}^+ \rangle] \quad (16)$$

La ecuación (9) junto con la condición de contorno dada por la ecuación (11) permiten evaluar \vec{f} / p_i valor que sustituido en la ecuación (16) nos daría el coeficiente de sensibilidad. Sin embargo, a pesar de que la ecuación (9) es lineal dado que el operador

matricial y el término fuente no son función del vector de estado derivado (H depende de \vec{f} más no de \vec{f} / p_i), su solución presenta el inconveniente de depender del parámetro pi.

Por lo anterior se tiene que por cada parámetro de interés para el estudio de un funcional dado debe resolverse una nueva ecuación como la (9) para obtener el valor f/p_i que será utilizado en la ecuación (17). En otras palabras, para cada funcional dado, si se quieren analizar "l" parámetros se tendrán también "l" ecuaciones a resolver.

Es por eso que se recurre al uso de un sistema de ecuaciones adjunto asociado a la ecuación (9) el cual además de permanecer lineal, presenta la ventaja con respecto al anterior sistema de no depender de pi, como se verá a continuación.

Ecuación Adjunta

Definiendo un operador H^* "Adjunto Extendido" de H, por la expresión:

$$\langle \vec{f} / p_i \cdot H^* \cdot \vec{f}^* \rangle = \langle \vec{f}^* \cdot H \cdot \vec{f} / p_i \rangle + P(\vec{f}^*, \vec{f} / p_i) \quad (17)$$

donde:

\vec{f}^* : es el vector adjunto de \vec{f} / p_i

$P(\vec{f}^*, \vec{f} / p_i)$: es el concomitante bilineal de

\vec{f} y \vec{f} / p_i evaluado en el entorno del espacio de fase. Es lineal tanto en \vec{f}^* como en \vec{f} / p_i .

Es posible definir el problema adjunto planteando las ecuaciones adjuntas a las ecuaciones (9) y (11) formalmente como sigue:

$$\text{Ecuación Adjunta: } H^* T_1^* = S^+ \quad (18)$$

:

Condiciones de contorno adjuntas:

$$\vec{c}^* (\vec{f}^*) = \vec{0} \quad (19)$$

\vec{S}^+ es el vector de funciones de peso

$$\vec{S}^+ = [S_1^+, S_2^+, \dots, S_K^+] \quad (20)$$

Remplazando las ecuaciones (9) y (18) en la ecuación (17) y con las consideraciones anteriores, sta puede ser rescrita como:

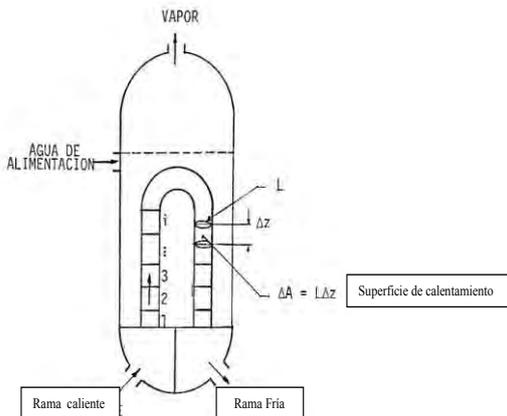
$$\langle \vec{f}/\rho_1 \cdot \vec{S}^+ \rangle = \langle \vec{f}^* \cdot \vec{S}(p_i) \rangle + P(\vec{f}^* \cdot \vec{f}/\rho_1) \quad (21)$$

Ecuación que remplazada en la ecuación (13) resulta en:

$$\delta R = \sum_{i=1}^I \delta p_i [\langle \vec{f} \cdot \vec{S}^+_{/i} \rangle + \langle \vec{f}^* \cdot \vec{S}(p_i) \rangle + P(\vec{f}^* \cdot \vec{f}/\rho_1)] \quad (22)$$

La ecuación (22) permite evaluar δR a partir de una solución de la ecuación directa (1) con la condición de contorno dada por la ecuación (2) y una solución de la ecuación adjunta(18), independiente de p_i , con la condición de contorno dada por la ecuación(19).

APLICACIÓN AL MODELO HOMOGÉNEO DE GENERADOR DE VAPOR



Ecuaciones básicas

La ecuación directa resulta de aplicar la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación de energía para un flujo unidimensional en régimen permanente en el primario. Se demuestra que:

$$\rho_1 \cdot V_1 \frac{dhe_1}{dZ} - \frac{dq_1''}{dZ} = 0 \quad (23)$$

donde:

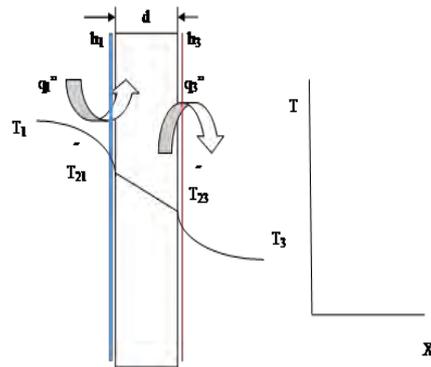
- ρ_1 : Densidad del fluido primario (Kg/ m³)
- V_1 : Velocidad del fluido primario, (m/s)
- he_1 : Entalpia específica del fluido primario, (J/Kg)
- q_1'' : Flujo de calor a través de la pared del primario, (J/m².s)

Asimismo, la ecuación de conducción de calor o Ley de Fourier, aplicada a la pared de transferencia de calor (tubería del circuito primario), resulta en:

$$\frac{dT_2}{dx} - \frac{(\tilde{T}_{23} - T_{21})}{d} = 0 \quad (24)$$

donde:

- ρ_1 : Densidad del fluido primario (Kg/m³)
- V_1 : Velocidad del fluido primario, (m/s)
- he_1 : Entalpia específica del fluido primario, (J/Kg)
- q_1'' : Flujo de calor a través de la pared del primario, (J/m².s)



Es posible reescribir la *ecuación directa* (23) como:

$$\frac{dT_1}{dz} + b(T_1) T_1 = b(T_1) \cdot T_{SAT} \quad (25)$$

donde:

$$b'' = b + \frac{\partial b}{\partial T_1} (T_1 - T_{SAT})$$

$$b(T_1) = \frac{h_1 \cdot A_T}{W_1 \cdot Cp_1 \cdot H_t} \left[\frac{1}{1 + \frac{h_1}{h_3} + \frac{h_1 \cdot d}{k_2}} \right] \quad (25a)$$

siendo:

- A_T : Area total de transferencia de calor, (m²) = $N_t \cdot \pi \cdot \bar{D} \cdot H_t$
- N_t : Número total de tubos del generador de calor
- C_{p1} : Calor específico del fluido primario, (J/m².s)
- \bar{D} : Diámetro medio de los tubos del generador de calor, (m)
- H_t : Longitud de cada tubo, (m)
- W_1 : Flujo másico del primario, (Kg/s) = $\rho_1 \cdot V_1 \cdot A_1$
- K_2 : conductividad térmica de la pared de los tubos, (J/m.s.°C)
- d : Espesor de la pared de los tubos, (m)

la ec. (23) se puede escribir de otra forma:

$$m(T_1, p) = L T_1 - \Phi = 0 \quad (26)$$

donde:

$$L = \frac{d}{dz} + b(T_1)$$

$$\Phi = b T_{SAT}$$

(Por comodidad llamaremos a $b(T_1) = b$ de aquí en adelante.)

Luego, debido pues a las hipótesis simplificadoras adoptadas, el problema se reduce al cálculo del campo de temperaturas T_1 , obteniéndose las demás temperaturas (T_2 y T_3) en función de T_1 .

Derivando la ec.(26) con relación a un parámetro "p" cualquiera :

$$\frac{dm}{dp} = \frac{\partial \bar{m}}{\partial T_1} \frac{\partial T_1}{\partial p} + \frac{\partial m}{\partial p} = 0$$

se obtiene la *ecuación derivada* que puede ser escrita como:

$$H T_1 / p = S(p) \quad (27)$$

donde se demuestra que:

$$H = \frac{\partial \bar{m}}{\partial T_1} = \frac{\partial}{\partial z}(\cdot) + b''(\cdot)$$

$$b'' = b + \frac{\partial b}{\partial T_1} (T_1 - T_{SAT})$$

$$T_1 / p = \frac{\partial T_1}{\partial p}$$

$$\vec{S}(p_i) = - \frac{\partial m}{\partial p_i} = - \frac{\partial b}{\partial p_i} (T_1 - T_{SAT}) + b \frac{\partial T_{SAT}}{\partial p_i}$$

El Funcional de Respuesta

Consideremos un funcional o respuesta genérica no lineal

$$R = \langle \alpha T_1 + \beta \rangle \quad (28)$$

Donde:

$$\alpha = f_1(T_1, p_i)$$

$$\beta = f_2(T_1, p_i)$$

$\langle (\cdot) \rangle$ Representa la integración efectuada a todo lo largo de los tubos del generador de vapor

El coeficiente de sensibilidad de "R", con relación al parámetro "p_i", es obtenido derivando la ecuación (28) con relación a "p_i", esto es:

$$\frac{dR}{dp_i} = \langle S^+ T_1 / p_i \rangle + \langle \frac{\partial \alpha}{\partial p_i} T_1 \rangle + \langle \frac{\partial \beta}{\partial p_i} \rangle \quad (29)$$

$$S^+ = \left[\alpha + \frac{\partial \alpha}{\partial T_1} T_1 + \frac{\partial \beta}{\partial T_1} \right] \quad (30)$$

Caso Particular

Un caso particular que se presenta con frecuencia es aquel en el cual "R" es lineal con respecto a T_1 . En este caso, α es independiente de T_1 y $\beta = 0$ y las ecuaciones (29) y (30) se transforman en:

$$\frac{dR}{dp_i} = \langle S^+ T_1 / p_i \rangle + \langle S^+ / p_i T_1 \rangle \quad (31)$$

$$S^+ = \alpha \quad (32)$$

El coeficiente de sensibilidad dR/dp_i puede calcularse a partir de la ecuación (31) siempre y cuando se conozcan T_1 y T_1 / p_i .

Las ecuaciones (26) y (27) permiten obtener el valor de T_1 y T_1 / p_i respectivamente. Sin embargo, la solución de la ecuación (27) presenta el inconveniente de depender del parámetro "p_i". Este problema puede ser resuelto y evitado hallando la *ecuación adjunta* de la ecuación (27).

El Problema Adjunto y el Concomitante Bilineal

De la definición de operador adjunto extendido, anteriormente mencionado, se tiene que:

$$\langle T_1 / p_i, H^* T_1^* \rangle = \langle T_1^*, H T_1 / p_i \rangle + P(T_1^*, T_1 / p_i) \quad (33)$$

Escribiendo el sistema adjunto como:

$$H^* T_1^* = S^+ \quad (34)$$

donde:

S+ = Término de fuente relacionado con el funcional R, a través de las ecuaciones (28) y (30).

Se demuestra que:

$$\tilde{H}^* = -\frac{\partial}{\partial z} + b'' \quad (35)$$

donde:

$$b'' = b + \frac{\partial b}{\partial T_1} (T_1 - T_{SAT}) \quad (36)$$

siendo:

$$b = b(T_1) = \frac{h_1 A_r}{W_1 C_{p1} H_i} \left[\frac{1}{1 + \frac{h_1}{h_3} + \frac{h_1 d}{k_2}} \right]$$

y además:

$$\begin{aligned} P(T_1^*, T_{1/p_i}) &= T_{10}^* \frac{\partial}{\partial p} T_{10} \\ &= T_{10}^* \cdot T_{10/p_i} \end{aligned} \quad (37)$$

donde

$$\begin{aligned} T_{10} &= T_1(z=0) \\ T_{10}^* &= T_1^*(z=0) \end{aligned}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (34) se obtiene la ecuación adjunta de la ecuación (27):

$$-\frac{\partial T_1^*}{\partial z} + b'' T_1^* = S^+ \quad (38)$$

Esta ecuación es lineal, dado que b'' depende de T1 más no de T1* y su solución es independiente de las variaciones del parámetro "pi".

La condición de contorno, impuesta por conveniencia, es:

$$T_1^*(z = H_i) = 0$$

o sea, el valor de la función importancia es nulo en el punto final.

Sustituyendo las ecuaciones (27), (34) y (37) en la ecuación (33) se obtiene:

$$\langle T_{1/p_i} S^+ \rangle = \langle T_1^* S(p_i) \rangle + T_{10}^* T_{10/p_i} \quad (39)$$

Finalmente, sustituyendo (39) en (29) se obtiene la expresión del coeficiente

de sensibilidad de "R" con relación al parámetro arbitrario "p", esto es:

$$\frac{dR}{dp_i} = \langle T_1^* S(p_i) \rangle + T_{10}^* T_{10/p_i} + \langle \alpha_{/p_i} \cdot T_1 \rangle + \langle \beta_{/p_i} \rangle \quad (40)$$

De este modo, resolviendo las ecuaciones (25) y (38) podemos pues calcular dR/dpi a partir de la ecuación (40) ya que a, b y y S+ son conocidos con la definición de R y pi y el valor de S(pi) es calculado (ver ec. 27).

Discretizando la ecuación (40) esta puede ser escrita aproximadamente :

$$\Delta R = \sum_{i=1}^N \{ [T_{1j}^* S(p_i) + T_{10}^* T_{10/p_i} + \alpha_{/p_i} T_{1j} + \beta_{/p_i}] \Delta p_i \} \Delta z \quad (41)$$

DESCRIPCION DEL CASO ANALIZADO

FUNCIONAL: TEMPERATURA MEDIA DEL FLUIDO PRIMARIO (\bar{T}_1)

En este caso:

$$\bar{T}_1 = \frac{1}{H_i} \int_0^{H_i} T_1(z) dz \quad (42)$$

De la ecuación (29), por definición tenemos:

$$R_1 = \bar{T}_1 = \int_0^{H_i} (\alpha_1 T_1 + \beta_1) dz \quad (43)$$

Comparando (42) con (43) se deduce que:

$$\alpha_1 = \frac{1}{H_i} \quad (44)$$

$$\beta_1 = 0$$

y de la ecuación (30) se obtiene:

$$S^+ = \frac{1}{H_i} \quad (45)$$

En este caso, para el análisis de sensibilidad fueron seleccionados los siguientes parámetros:

Cp1, h1, h3, K2, W1.

RESULTADOS Y DISCUSION

La Tabla 1 muestra los resultados de los cálculos de sensibilidad de la temperatura media del fluido primario con relación a uno de los parámetros seleccionados.(Cp1)

En dichas Tablas, RNP representa la respuesta no perturbada. RP.DIF la respuesta perturbada calculada a partir del formalismo diferencial y RPDIR, la respuesta perturbada calculada directamente a través del modelo de simulación. “Δ” representa el módulo de la diferencia relativa entre RP.DIF y RP.DIR y finalmente, $R_{/p_i}$ representa la sensibilidad del funcional “R” relativa al parámetro “pi” y es definida como:

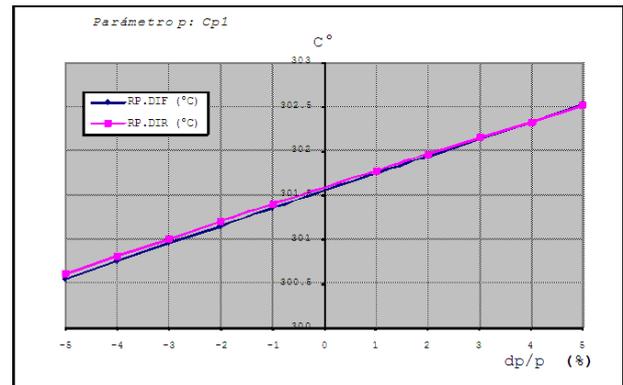
$$R_{/p_i} = \frac{(RP.DIF - RNP) / RNP}{\delta p_i / p_i} \tag{46}$$

Evidentemente, una vez calculado $R_{/p_i}$ para algún valor cualquiera de $\delta p_i / p_i$, se podrán calcular los demás valores de RP.DIF, para cada valor de $\delta p_i / p_i$ de los parámetros analizados, directamente utilizando la ecuación (46).

Tabla 1: Resultados de sensibilidad de la temperatura media del fluido primario con relación al calor específico del primario.(Cp1)

R	RNP (°C)	p	$\delta p / p_i$ %	RP.DIF (°C)	RP.DIR (°C)	Δ (%)	$R_{/p_i}$ (x10)
\bar{T}_1	301.540	Cp1	5	302.526	302.507	0.01	0.65398
			4	302.329	302.327	0.00	
			3	302.131	302.144	0.00	
			2	301.934	301.960	-0.01	
			1	301.737	301.773	-0.01	
			-1	301.342	301.393	-0.02	
			-2	301.145	301.200	-0.02	
			-3	300.948	301.004	-0.02	
			-4	300.751	300.807	-0.02	
			-5	300.553	300.607	-0.02	

GRAFICO 1



OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Como conclusión podemos afirmar que el programa desarrollado para la aplicación de la Teoría de Perturbación-Formalismo Diferencial en el análisis de sensibilidad en generadores de vapor del tipo de tubos en U de Centrales Nucleares PWR, como el de la central Angra 1 del Brasil - resulta adecuado y permite analizar diferentes parámetros térmicos.

A diferencia de un análisis típico de sensibilidad usando las ecuaciones directas, que requiere muchas corridas y deben realizarse para cada parámetro y para cada orden de magnitud o variación de los parámetros, las ecuaciones del formalismo perturbativo diferencial son lineales, de solución rápida permitiendo obtener valores de sensibilidad para diversos parámetros termo-hidráulicos con un solo cálculo inicial (una sola corrida del programa desarrollado).

AGRADECIMIENTOS

A los Drs. Carlos Marques Alvim y Fernando Andrade Lima de la UNFRJ-Rio de Janeiro por su asesoría en Brasil y a los Srs. Magíster Alberto Gallardo Padilla, asesor en el IPEN-Lima-Perú, y Agustín Zúñiga y Rubén Bruna por su contribución al desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] GIOL S.R.,A, "Aplicación de la Teoría de Perturbación – Formalismo Diferencial- para el análisis de sensibilidades de variables termo-hidráulicas de un generador de vapor de la Central Nuclear Angra 1 del Brasil", Tesis para la obtención del Grado de Magíster en Energía Nuclear en la Universidad Nacional de Ingeniería-Facultad de Ciencias, Lima, Diciembre del 2010.
- [2] LOBO DE SOUZA, A., "Modelo Homogéneo de um Gerador de Vapor para Simulacao de transitorios Operacionais e accidentes em Centrâis Nucleares tipo PWR". Tesis de Maestría IME (1981).