

# APLICACION DE LA TEORIA DE PERTURBACION METODO DIFERENCIAL AL ESTUDIO DE SENSIBILIDAD EN GENERADORES DE VAPOR DE CENTRALES NUCLEARES TIPO PWR

Roberto Giol Sanders

*Instituto Peruano de Energía Nuclear Apto. 1687, Lima 100, Perú*

*Received July 7 , 1988*

## Abstract

*This work presents an application of the differential approach of perturbation theory to a homogeneous model of a PWR steam generator under steady - state conditions. Program PERGEVAP was built from the code GEVAP, developed by Souza [1], and allows sensitivity calculations of linear (like the average primary loop temperature) and nonlinear (like the average heat flux) functionals to variations in thermohydraulics parameters, such as flow enthalpy and specific heat. The results obtained with this approach are compared to direct calculations using GEVAP, with excellent agreement. The method has good potential to treat repeated calculations needed in the design and analysis of these equipments.*

## Resumen

*En este trabajo se presenta una aplicación del formalismo diferencial de la teoría de perturbación a un modelo homogéneo de simulación del comportamiento estacionario de generadores de vapor de centrales nucleares PWR. El programa PERGEVAP, desarrollado a partir del modelo del código GEVAP de Souza, permite realizar cálculos de la sensibilidad de funcionales lineales (como la temperatura media del primario) y no-lineales (como el flujo de calor medio) a variaciones en los parámetros termohidráulicos, tales como flujo masico, entalpía y calor específico.*

*Los resultados obtenidos con este formalismo son comparados con los obtenidos del cálculo directo con el propio código GEVAP, pudiéndose apreciar una excelente concordancia. La metodología se presenta promisoría para tratar cálculos repetitivos asociados al proyecto y al análisis de seguridad de estos equipos.*

## 1 Introducción

El desarrollo de una teoría para el análisis de sensibilidad basado en el uso de funciones adjuntas ha progresado significativamente desde la primera aplicación a la física de reactores [2,4] y blindaje [5,6] habiendo sido probada su potencialidad por Stacey [7] y Greenspan [8] en problemas lineales y por Becker [9] y Greenspan [10], para analizar problemas no lineales y para desarrollar teorías de orden elevado para operadores lineales.

Actualmente la mencionada teoría está también siendo aplicada al área de termohidráulica de reactores, con muy buenos resultados, tanto en problemas lineales como no lineales y es así que varios formalismos han sido utilizados para obtener las ecuaciones adjuntas [11] y son los siguientes:

1. Formalismo Diferencial [12,13] y Matricial (variante del diferencial)
2. Formalismo de Perturbación Generalizada (GPT) [4,14].
3. Formalismo Variacional [4,15].

Andrade Lima y Alvim [16] demuestran en su trabajo la equivalencia entre los formalismos Diferencial, GPT y el Matricial en el análisis de un problema transitorio y los cálculos de los coeficientes de sensibilidad son bastante semejantes y concordantes entre sí y con los cálculos directos.

El formalismo adoptado en el presente trabajo es el diferencial, el cual ya fue utilizado en el Área Termohidráulica por Oblow y Weber [17] y Oblow [18], los cuales desarrollaron expresiones de Perturbación relativas a un funcional genérico en un problema transiente de un Reactor Nuclear.

## 2. Descripción breve del Formalismo Diferencial

Consideremos el problema general de un sistema físico, de  $K$  ecuaciones no lineales acopladas, descrito por un campo vectorial  $f$  con  $N$  componentes gobernado por la ecuación de operadores (lineales y no lineales):

$$m(f(\underline{x}), \underline{p}) = 0, \quad (1)$$

donde:

$$f(\underline{x}) = [f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}), \dots, f_k(\underline{x})] \quad (2)$$

La ec. (1) se asume es derivable con respecto a los parámetros  $p_i$  y a las funciones  $f_k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ).

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_3] \rightarrow \text{vector de posición en el espacio de fase} \quad (3)$$

$$\underline{p} = \underline{p}(\underline{r}) = [p_1(\underline{r}), p_2(\underline{r}), \dots, p_N(\underline{r})] \quad (4)$$

Sea un funcional respuesta  $R(f(\underline{x}), \underline{p})$  definido por:

$$R(\underline{f}, \underline{p}) = \langle S^+(\underline{r}) f(\underline{x}) \rangle \quad (5)$$

donde:

$S^+(\underline{r})$  : función conocida y la integración  $\langle \rangle$  se realiza en todo el espacio de fase

La variación de R resultante de las perturbaciones  $\delta p_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) es obtenida de la ec. (5) :

$$\delta R = \sum_{i=1}^N \delta p_i \left[ \langle \underline{S}^+ / p_i \underline{f} \rangle + \langle \underline{S}^+ \underline{f} / p_i \rangle \right] \quad (6)$$

donde :

$$\underline{S}^+ / p_i = \frac{\partial \underline{S}^+}{\partial p_i} ; \underline{f} / p_i = \frac{\partial \underline{f}}{\partial p_i} \quad (7)$$

Para obtener  $\delta R$  es necesario obtener  $\underline{f} / p_i$  para lo cual se expande la ecuación perturbada  $\underline{m}'(\underline{f}^*, \underline{p}') = 0$  alrededor de una solución de referencia  $\underline{f}$  (unívocamente determinada pues los parámetros  $p_i$  son conocidos) hasta primer orden. Se demuestra que dado que las perturbaciones  $\delta p_i$  (admitidas independientes) son arbitrarias, debe cumplirse en la ecuación expandida que :

$$\underline{H} \underline{f} / p_i = \underline{S} (p_i) \quad (8)$$

donde :

$$\underline{H} = \frac{\partial \underline{m}}{\partial \underline{f}} ; \underline{f} / p_i = \frac{\partial \underline{f}}{\partial p_i} ; \underline{S} (p_i) = - \frac{\partial \underline{m}}{\partial p_i} \quad (9)$$

y además :

$$\frac{\partial \underline{S}}{\partial p_i} + \frac{\partial \underline{S}}{\partial \underline{f}} \frac{\partial \underline{f}}{\partial p_i} = 0 \quad (\text{Condición de contorno para la ec. (8)}) \quad (10)$$

La ec (8) junto con la condición de contorno dada por la ec (10) permite evaluar  $\underline{f} / p_i$ , valor que sustituido en la ec. (6) nos dará el valor buscado de  $\delta R$ . Sin embargo, a pesar de que la ec. (8) es lineal ( $\underline{H}$  no depende de  $\underline{f} / p_i$ ) su solución presenta el inconveniente de depender del parámetro  $p_i$ . Por esta razón se recurre al sistema de ecuaciones adjuntas, el cual además de ser lineal tiene la ventaja de no depender de  $p_i$ .

Se define así un operador  $\underline{H}^*$ , "Adjunto extendido" de  $\underline{H}$ , dado por :

$$\langle \underline{f} / p_i \underline{H}^* \underline{f} \rangle = \langle \underline{f}^* \underline{H} \underline{f} / p_i \rangle + P (\underline{f}^*, \underline{f} / p_i) \quad (11)$$

donde :

$\underline{f}^*$  : Adjunta de  $\underline{f} / p_i$

$P(\underline{f}^*, \underline{f} / p_i)$  : "Concomitante bilineal" de  $\underline{f}^*$  y  $\underline{f} / p_i$  evaluado en el contorno del espacio de fase.

Con lo cual es posible escribir el sistema adjunto de (8) y (10) como :

$$\underline{H}^* \underline{f}^* = \underline{S}^* \quad (12)$$

$$\text{y } \underline{C}^* (\underline{f}^*) = 0 \quad (13)$$

de donde, con una adecuada selección de las condiciones de contorno dadas por la ec. (13) será posible calcular  $P(\underline{f}^*, \underline{f}/\pi_i)$  a partir de los valores conocidos de  $\underline{f}/\pi_i$  evaluados en el contorno del espacio de fase. Luego, la ec. (11) puede ser reescrita como :

$$\langle \underline{f}/\pi_i \underline{S}^+ \rangle = \langle \underline{f}^* \underline{S}(\pi_i) \rangle + P(\underline{f}^*, \underline{f}/\pi_i) \quad (14)$$

ecuación que sustituida en la ec (6) resulta en

$$\delta R = \sum_{i=1}^N \delta \pi_i \left[ \langle \underline{f} \underline{S}^+ / \pi_i \rangle + \langle \underline{f}^* \underline{S}(\pi_i) \rangle + P(\underline{f}^*, \underline{f}/\pi_i) \right] \quad (15)$$

La ec. (15) permite calcular  $\delta R$  a partir de una solución de referencia del sistema de ecuaciones (1) con la condición de contorno dada por la ecuación :

$$\underline{C}(\underline{f}(\underline{r}^S), p) = 0 \quad (16)$$

y una solución del sistema lineal (12), independiente de  $\pi_i$ , con la condición de contorno dada por la ec. (13).

### 3. Modelo del Generador de Vapor.— Ecuaciones Básicas.

Las ecuaciones de continuidad y conservación de la Energía para un flujo unidimensional en régimen permanente, aplicadas al fluido Primario, considerando las mismas hipótesis básicas de Souza, resultan en :

$$\rho_1 V_1 \frac{dH_1}{dz} - \frac{d\dot{q}_1''}{dz} = 0 \quad (17)$$

Donde :

$\rho_1$  : Densidad del fluido primario, (Kg / m<sup>3</sup>)

$V_1$  : Velocidad del fluido primario, (m/s)

$H_1$  : Entalpía específica del fluido primario, (J/kg)

$\dot{q}_1''$  : Flujo de calor a través de la pared del primario, (J / m<sup>2</sup> S)

La ecuación de conducción de calor aplicada a la pared de transferencia de calor (tuberías del primario) resulta en:

$$\frac{dT_2}{dX} - \frac{(T_{23} - T_{21})}{d} = 0 \quad (18)$$

donde:

- $T_2$  : Temperatura transversal de la pared, °C
- $T_{21}$  : Temperatura en la superficie de la pared, del lado del primario, °C
- $T_{23}$  : Temperatura en la superficie de la pared, del lado del secundario, °C.
- $d$  : Espesor de la pared.

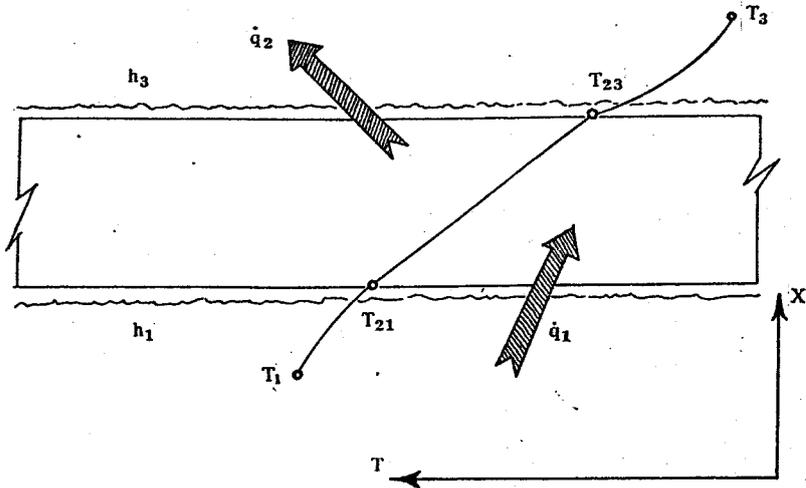


Figura 1

Aplicando las condiciones de contorno en las superficies de la pared y con algunas consideraciones prácticas, puede demostrarse que:

$$T_{21} = \left( \frac{1}{1+\gamma} \right) T_{SAT} + \left( \frac{\gamma}{1+\gamma} \right) T_1 \quad (19)$$

donde:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_3} + \frac{h_1 d}{K_2}$$

- $h_1$  : Coeficiente de transferencia de calor entre la pared y el fluido primario.
- $h_3$  : Coeficiente de transferencia de calor entre la pared y el fluido secundario.
- $T_1$  : Temperatura, del fluido primario

$T_3$  : Temperatura, del fluido secundario.  
 $K_2$  : Conductividad termica de la pared.

Ahora bien, considerando que  $dH_1 = C_{p1} dT_1$  es posible también reescribir la ecuación (17) como:

$$\frac{dT_1}{dZ} + b(T_1) = b(T_1) T_{SAT} \quad (20)$$

Por lo tanto, debido a las hipótesis 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  $T_1$ . En la ecuación (20) se tiene que:

$$b(T_1) = \frac{h_1 A_T}{W_1 C_{p1} H_t} \left[ \frac{1}{1 + \frac{h_1}{h_3} + \frac{h_1 d}{K_2}} \right] \quad (21)$$

donde:

$A_T$  : Area total de transferencia de calor  
 $= N_t \pi D H_t$

$N_t$  : Número total de tubos del primario

$D$  : Diámetro medio de los tubos

$H_t$  : Altura de cada tubo

$W_1$  : Flujo de masa del primario =  $\rho_1 V_1 A_1$

#### 4. Aplicación de la Teoría de Perturbación al Modelo

La ecuación (20) puede ser escrita como:

$$m(T_1, P) = L_z T_1 - S = 0 \quad (22)$$

donde:

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

$$S = b(T_1)$$

Por comodidad haremos  $b(T_1) = b$  de aquí adelante.  
 Derivando la ecuación (22) con respecto a un parámetro "p" cualquiera se obtiene:

$$\overline{H} T_1/p = S(p) \quad (23)$$

donde:

$$\overline{H} = \frac{\partial m}{\partial T_1} = \frac{\partial (\cdot)}{\partial Z} + b''(\cdot) \quad (24.1)$$

$$b'' = b + \frac{\partial b}{\partial T_1} (T_1 - T_{SAT}) \quad (24.2)$$

$$T_1/p = \frac{\partial T_1}{\partial p} \quad (24.3)$$

$$S(p) = - \frac{\partial m}{\partial p} = - \frac{\partial b}{\partial p} (T_1 - T_{SAT}) - b \frac{\partial T_{SAT}}{\partial p} \quad (24.4)$$

Consideremos un funcional o respuesta genérica no lineal, R, del tipo

$$R = \langle \alpha T_1 + \beta \rangle \quad (25)$$

donde:

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

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

y  $\langle \rangle$  representa la integración a lo largo de los tubos del primario.

El coeficiente de sensibilidad de "R" con relación al parámetro "p", es obtenido derivando la ecuación (25) con relación a "p".

$$\frac{dR}{dp} = \langle \alpha T_1/p \rangle + \langle \alpha/p T_1 \rangle + \langle \beta/p \rangle \quad (26)$$

$$= \left\langle \left[ \alpha + \frac{\partial \alpha}{\partial T_1} T_1 + \frac{\partial \beta}{\partial T_1} \right] T_1/p \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \alpha}{\partial p} T_1 \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \beta}{\partial p} \right\rangle$$

Definiendo :

$$S^+ = \left[ \alpha + \frac{\partial \alpha}{\partial T_1} T_1 + \frac{\partial \beta}{\partial T_1} \right] \quad (27)$$

y sustituyendo en la ecuación (26) se obtiene :

$$\frac{dR}{dp} = \left\langle S^+ T_1/p \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \alpha}{\partial p} T_1 \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \beta}{\partial p} \right\rangle \quad (28)$$

donde :

$$\left\langle S^+ T_1/p \right\rangle = \left\langle S^+/p T_1 \right\rangle + \left\langle T^* S(p) \right\rangle + P(T_1/p, T^*) \quad (29)$$

#### 4.1 Caso particular.

Un caso que ocurre con frecuencia es aquel en que "R" es lineal con relación a  $T_1$ . En este caso " $\alpha$ " es independiente de  $T_1$  y  $\beta = 0$ . Las ecuaciones (27) y (28) se transforman en :

$$S^+ = \alpha \quad (30)$$

$$\frac{dR}{dp} = \left\langle S^+ T_1/p \right\rangle + \left\langle S^+/p T_1 \right\rangle \quad (31)$$

El coeficiente de sensibilidad  $\frac{dR}{dp}$  puede ser calculado a partir de la ecuación (28), siempre que se conozcan  $T_1$  y  $T_1/p \cdot dp$ .

Las ecuaciones (22) y (23) permiten obtener  $T_1$  y  $T_1/p$ , respectivamente.

Sin embargo, la solución de la ecuación (23) presenta el inconveniente de depender del parámetro "p". Este problema puede ser evitado por la utilización de la ecuación adjunta a la ecuación (23).

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

$$\left\langle T_1/p \quad H^* T_1^* \right\rangle = \left\langle T_1^* \quad H T_1/p \right\rangle + P(T_1^*, T_1/p) \quad (32)$$

Escribiendo el sistema adjunto como :

$$\tilde{H}^* T_1^* = S^+ \quad (33)$$

donde :

$S^+$  : Término de fuente relacionado al funcional "R" a través de las ecuaciones (25) y (27)

se demuestra que :

$$\tilde{H}^+ = \frac{\partial}{\partial z} + b'' \quad (34)$$

y

$$P(T_1^*, T_1/p) = -T_{10}^* \frac{\partial T_{10}}{\partial p} \quad (35)$$

donde :

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

Entonces, la ecuación adjunta de la ecuación (23) estará dada por :

$$-\frac{\partial T_1^*}{\partial z} + b'' T_1^* = S^+ \quad (36)$$

que es lineal, dado que  $b''$  no depende de  $T_1^*$  y su solución es independiente de las variaciones del parámetro "p".

La condición de contorno, impuesta por conveniencia, es :

$$T_1^*(Z = H_t) = 0 \quad (37)$$

O sea, la función adjunta se anula en el punto final

Sustituyendo las ecuaciones (23), (33) y (35) en la ecuación (32), se obtiene :

$$\langle T_{1/p} S^+ \rangle = \langle T_1^* S(p) \rangle - T_{10}^* T_{10}/p \quad (38)$$

Finalmente, sustituyendo la ecuación (38) en la ecuación (28) se obtiene la expresión del coeficiente de sensibilidad de "R" en relación al parámetro arbitrario "p".

$$\frac{dR}{dp} = \langle T_1^* S(p) \rangle - T_{10}^* T_{10}/p - \langle \alpha/p T_1 \rangle + \langle \beta/p \rangle \quad (39)$$

Así, resolviendo las ecuaciones (20) y (36) podemos calcular  $\frac{dR}{dp}$  a partir de la ecuación (39) dado que  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $S^+$  son conocidos cuando se definen "R" y "p" y  $S(p)$  es calculado por la ecuación (24.4).

## 5. CASOS ANALIZADOS

### 5.1 Primer Funcional.— Temperatura media del fluido primario ( $T_1$ )

En este caso :

$$\bar{T}_1 = \frac{1}{H_t} \int_0^{H_t} T_1(z) dz \quad (40)$$

Comparando la ecuación (40) con la ecuación (25) se deduce que :

$$\alpha_1 = \frac{1}{H_t} \quad \text{y} \quad \beta_1 = 0 \quad (41)$$

y de la ecuación (27) se obtiene que :

$$S^+ = \frac{1}{H_t}$$

En este caso, para el análisis de sensibilidad, fueron seleccionados los siguientes parámetros :  $C_{p1}$ ,  $h_1$ ,  $h_3$ ,  $k_2$  y  $w_1$

### 5.2 Segundo Funcional.— Flujo de calor medio transferido a través de la pared por el fluido primario ( $\bar{q}_1$ )

En este caso :

$$\begin{aligned} \bar{q}_1 &= \frac{1}{H_t} \int_0^{H_t} -h_1 \left[ \frac{A_T}{N} \right] (T_1 - T_{21}) dz \\ &= \frac{A_T}{N H_t} \int_0^{H_t} -h_1 (T_1 - T_{21}) dz \end{aligned} \quad (42)$$

Considerando el valor de  $T_{21}$  obtenido mediante la ecuación (19) podemos reescribir la ecuación (42) como :

$$R_2 = \bar{q}_1 = \frac{A_T}{NH_t} \int_0^{H_t} (\alpha_2 T_1 + \beta_2) dz \quad (43)$$

donde :

$$\alpha_2 = - \frac{h_1}{1 + \frac{h_1}{h_3} + \frac{h_1 d}{k_2}} \quad (43.1)$$

y

$$\beta_2 = - \alpha_2 T_{SAT} \quad (43.2)$$

$S^+$  es calculado por medio de la ecuación (27) con  $\partial \alpha / \partial T_1$  y  $\partial \beta / \partial T_1$  calculados a partir de la ecuación (43.1) : Así :

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial T_1} = \frac{\partial \alpha_2}{\partial h_1} \frac{\partial h_1}{\partial T_1} + \frac{\partial \alpha_2}{\partial h_3} \frac{\partial h_3}{\partial T_1} + \frac{\partial \alpha_2}{\partial k_2} \frac{\partial k_2}{\partial T_1} \quad (44)$$

## 6; RESULTADOS Y COMPARACIONES

La Tabla 1 muestra los resultados de los cálculos de sensibilidad de la temperatura media del fluido primario (funcional lineal) con relación a diversos parámetros seleccionados. En dicha tabla, RNP representa la respuesta no perturbada, RPDIF la respuesta perturbada calculada a través del formalismo diferencial y RPDIR, la respuesta perturbada calculada directamente a través del modelo de simulación. "  $\Delta$  " representa el módulo de la diferencia relativa entre RPDIF y RPDIR. Finalmente, "S" representa la sensibilidad de "R" con relación a "p" y es definida por :

$$S = \frac{(RPDIF - RPDIR)}{\partial p / p} \quad (45)$$

Evidentemente una vez calculado "S" para un dado valor de  $\partial p / p$ , se puede calcular los demás valores de RPDIF para cada valor de  $\partial p / p$  directamente por medio de la ecuación (45).

La tabla 2 muestra los resultados de la sensibilidad del flujo de calor medio a través de la pared del primario (funcional no lineal) con relación al calor específico y al flujo másico del primario.

**TABLA 1.— Resultados de la sensibilidad de la temperatura media del fluido primario con relación al  $C_p$ ,  $R_1$ ,  $H_3$ ,  $K_2$ , y  $W_1$ .**

R	P	RNP (°C)	$\delta p/p$ (o/o)	RPDIF (°C)	RPDIR (°C)	$\Delta$ (o/o)	S ( $\bar{x}_{10}$ )
$T_1$	$C_{p1}$	301.540	- 50	291.677	290.019	0.57	0.65398
			- 20	297.594	297.364	0.08	
			20	305.485	304.967	0.17	
			50	311.403	308.733	0.86	
	$h_1$		- 50	304.129	305.612	0.49	- 0.17179
			- 20	302.595	302.721	0.05	
			20	300.504	300.755	0.08	
			50	298.950	299.815	0.29	
	$h_3$		- 50	304.491	307.039	0.83	- 0.19633
			- 20	302.720	303.033	0.10	
			20	300.359	300.625	0.09	
			50	298.588	299.691	0.37	
	$K_2$		- 50	305.862	305.113	0.25	- 0.28719
			- 20	303.268	302.585	0.23	
			20	299.811	300.862	0.35	
			50	297.218	300.093	0.96	
	$W_1$		- 15.7	298.443	300.916	0.82	0.65398
			- 10.	299.567	299.468	0.03	
			20	305.485	305.022	0.15	
			50	311.403	308.722	0.87	

**TABLA 2.— Resultados de la sensibilidad del flujo de calor medio a través de la pared del primario, con relación al calor específico del fluido primario ( $C_p$ ) y al flujo másico del primario ( $W_1$ )**

R	P	RNP ( $\times 10^{-9w}$ )	$\delta p/p$ (o/o)	RPDIF ( $\times 10^{-9w}$ )	RPDIR ( $\times 10^{-9w}$ )	$\Delta$ (o/o)	S ( $\times 10$ )
$\bar{q}_1$	$C_{p1}$	- 0.112932	- 50	- 0.09074	- 0.07110	27.62	0.39316
			- 20	- 0.10406	- 0.10164	2.37	
			20	- 0.12181	- 0.11902	2.34	
			50	- 0.13512	- 0.12432	8.69	
	$W_1$		- 15.7	- 0.10597	- 0.07851	34.97	0.39316
			- 10	- 0.10849	- 0.10451	3.83	
			20	- 0.12181	- 0.12345	1.33	
			50	- 0.13512	- 0.13387	0.93	

Como puede observarse, los resultados obtenidos a través de la teoría de perturbación y aquellos obtenidos a través del cálculo directo, muestran una excelente concordancia, incluso para variaciones relativas en el parámetro "p" del orden de  $\pm 50$  o/o. En el caso del flujo másico,  $w_1$  este parámetro no puede asumir variación de valores menores de  $-15.7$  o/o pues esta reducción produciría condiciones de temperatura en el primario de tal magnitud que impedirían el flujo de calor desde este hacia el fluido secundario, invalidando así el modelo de simulación.

## 7. CONCLUSIONES

Como conclusión se puede afirmar que el programa desarrollado de aplicación de la teoría de perturbación - Formalismo diferencial - al análisis de sensibilidad de generadores de vapor de Centrales Nucleares PWR, resulta adecuado y permite analizar diversos parámetros térmicos tales como  $C_p$ ,  $h$ ,  $k$ ,  $w$  para el caso de funcionales lineales y no lineales, con buenos resultados, principalmente cuando se trata de cálculos de naturaleza repetitiva; para lo cual la metodología desarrollada puede representar una importante y significativa economía de tiempo computacional. Este es el caso de los cálculos termohidráulicos normalmente ejecutados en el proyecto y en los análisis de seguridad de Centrales Nucleares. Finalmente, debe tenerse en cuenta las limitaciones del modelo de generador de vapor utilizado y la selección del funcional adecuado. Una de las limitaciones es de que el trabajo fué desarrollado para régimen estacionario, quedando abierta la posibilidad de aplicar el formalismo de perturbación al mismo modelo pero en régimen transitorio.

## 8. REFERENCIAS

- [1] SOUZA, A.L. de, "Modelo de un generador de vapor para simulacao de transitorios operacionais e acidentes em Centrais Nucleares PWR", Tesis de maestrado, IME Rio de Janeiro - Brasil (1981).
- [2] USACHEV, L.N., "Perturbation Theory for the breeding ratio and for other Number Ratios pertaining to various reactor processes", *J. Nuclear Energy*, 18,571 (1964).
- [3] GANDINI, A., "A generalized Perturbation Method for bilinear Functionals of the real and adjoint neutron fluxes", *J. Nuclear Energy*, 21,755 (1967)
- [4] STACEY Jr., W.M., "Variational Estimates and Generalized Perturbation theory for the Ratios of Linear and bilinear Functionals", *J. Math. Phys.*, 13, 1119 (1972)
- [5] BARTINE, D.E., OBLow, E.M. y MYNATT, F.R., "Radiation - transport Cross - Section Sensitivity Analysis - A General Approach Illustrated for a Thermonuclear Source in Air", *Nucl. Sei. Eng.*, 55, 147 (1974); tambien SWANLAKE, A Computer Code utilizing ANISN Transport Calculations for Cross - Section Sensitivity Analysis", ORNL - TM - 3809 (1973).

- [6] GERSTL, S.A.W. y STACEY Jr., W.M., "A class of Second - Order Approximate Formulations of Deep Penetration Radiation Transport Problems", *Nucl. Sci. Eng.*, 51, 339 (1973).
- [7] STACEY Jr. W.M., "Variational Methods in Nuclear Reactor Physics", Academic Press, Inc., New York (1974).
- [8] GREENSPAN, E., "Developments in Perturbation Theory, Advances in Nuclear Science and Technology, vol. 9, Academic Press, Inc, New York (1976).
- [9] BECKER, M., "Perturbation Theory for Ratios in linear and nonlinear problems", *Nucl. Sci., Eng.*, 62, 296 (1977).
- [10] GREENSPAN, E. y GILAI, D., "Second - Order Generalized Perturbation Theory for Source - Driven Systems", *Nucl. Sci. Eng.*, 68,1 (1978).
- [11] LEWINS, J., "The Adjoint Function", Pergamon Press Ltd., London (1965).
- [12] CACUCI, D.G., "Sensitivity Theory for General Systems of Nonlinear Equations", *Nucl. Sci. Eng.*, 75, 88 (1980).
- [13] OBLOW, E.M., "Sensitivity Theory from a Differential Viewpoint", *Nucl. Sci. Eng.* 59, 187 (1976); también "Corrigendum", *Nucl. Sci. Eng.*, 65, 428 (1978).
- [14] GANDINI, A., "Generalized Perturbation Theory (GPT) Methods - A Heuristic Approach", *Advances in Nuclear Science and Technology, Vol. 18* (1986).
- [15] WILLIAMS, M.L., "Development of Depletion Perturbation Theory for Coupled Neutron/Nuclide Fields", *Nucl. Sci. Eng.*, 70, 20 (1979).
- [16] ANDRADE LIMA, F.R. de, y ALVIM, A.C.M., "Aplicacao da Teoria de Perturbacao para Análise de Sensibilidade num Canal Refrigerante de Reatores Nucleares", sometido a la RBE en Octubre de 1986; ver también "TEMPERA: V2 - Um programa para análise de Sensibilidades num canal Refrigerante de Reatores Nucleares", PEN- 139-COPPE/UFRJ - Rio de Janeiro - Brasil (1986).
- [17] WEBER, C.F. y OBLOW, E.M., "Sensitivity Theory applied to transient-Thermal - Hydraulics problems", ORNL - TM - 6900 (1979).
- [18] OBLOW, E.M., "Sensitivity Theory for Reactor Thermal - Hydraulics problems", *Nucl. Sci. Eng.*, 68,322 (1978).
- [19] MEYER, C. A., "Thermodynamics and Transport properties of Steam", *ASTM Steam Tables, 3th Ed.*

Aplicación de la teoría de perturbación método diferencial al estudio de sensibilidad en generadores de vapor de centrales nucleares tipo PWR por Roberto Giol se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.