

## Desarrollo de un Módulo de Procesamiento para la Verificación de las Leyes de Conservación del código TRACE

*Autor:* A. Herrero

*Empresa:* Instituto de Ingeniería Energética, Universitat Politècnica de València

*Dirección:* Camino de Vera, S/N

*Teléfono:* 963879245

*E-mail:* alherca2@etsii.upv.es

Otros autores: J. L. Muñoz-Cobo / Dep. Ing. Química y Nuclear, Universitat Politècnica de València

A. Escrivá / Dep. Ing. Química y Nuclear, Universitat Politècnica de València

**Resumen** – El trabajo desarrollado en el contexto de esta ponencia se encuadra dentro de las labores de desarrollo y validación del código termohidráulico TRACE, centrándose en la verificación del mismo con el desarrollo de una herramienta de verificación que se implementa dentro del propio código. Para ello, se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, energía y momento para flujo monofásico y bifásico, empleando la metodología utilizada por el código TRACE. La verificación de los cálculos realizados por el código se lleva a cabo comparando los resultados obtenidos con el código TRACE con los obtenidos por la herramienta de verificación. Se han obtenido unos resultados satisfactorios, constituyendo un paso hacia delante más en la validación del código termohidráulico TRACE.

### 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha realizado un gran esfuerzo en el desarrollo de códigos termohidráulicos el comportamiento de reactores nucleares ante diferentes supuestos (transitorios, accidentes...). El CSN, mediante acuerdos con la NRC en el campo de investigación en seguridad nuclear, tiene acceso a códigos best-estimate en fase de desarrollo, como es el caso del código TRACE.

El desarrollo de un módulo de procesamiento para la verificación de las leyes de conservación del código TRACE, implementado dentro del propio código, nace del excelente posicionamiento que posee el código para que sustituya en un futuro próximo al código RELAP, actualmente utilizado en las centrales nucleares.

En esta ponencia se expone el proceso realizado para la elaboración del módulo de procesamiento implementado en el código TRACE. Se explica la obtención de las ecuaciones de conservación utilizadas, derivadas de las leyes de conservación de TRACE, y su discretización. Además, se muestran una serie de ensayos realizados para verificar los cálculos que el código realiza, tanto para flujo monofásico, como para flujo bifásico. Dicha verificación se realiza mediante la comparación de los resultados del código con los calculados por el módulo de procesamiento desarrollado. Se han obtenido unos resultados satisfactorios, avanzando de esta manera en la validación del código termohidráulico TRACE.

## 2. ECUACIONES DE CONSERVACIÓN DEL CÓDIGO TERMOHIDRÁULICO TRACE

El código termohidráulico TRACE utiliza las ecuaciones diferenciales derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes, para un modelo de flujo separado. Este modelo, considera que el fluido está dividido en dos fases, gas y líquido, separadas entre sí por una superficie llamada interfase.

El modelo de flujo separado no considera a las fases independientes entre sí, sino que cada fase interactúa con la otra a través de la interfase, apareciendo términos de transferencia entre cada fase con la interfase. Además, relaciona ambas fases mediante condiciones de salto con los términos de transferencia antes mencionados.

Por lo tanto, las ecuaciones que utiliza el código TRACE son las ecuaciones diferenciales derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes para una fase, formando un conjunto de seis ecuaciones (una ecuación por fase y por ecuación de conservación):

- Ecuación de conservación de la masa para la fase gas:

$$\frac{\partial(\alpha\rho_g)}{\partial t} + \nabla[\alpha\rho_g\vec{v}_g] = \Gamma \quad (2.1)$$

- Ecuación de conservación de la masa para la fase líquido:

$$\frac{\partial[(1-\alpha)\rho_l + \alpha\rho_g]}{\partial t} + \nabla[(1-\alpha)\rho_l\vec{v}_l + \alpha\rho_g\vec{v}_g] = 0 \quad (2.2)$$

- Ecuación de conservación de la energía para la fase gas:

$$\frac{\partial(\alpha\rho_g e_g)}{\partial t} + \nabla[\alpha\rho_g e_g \vec{v}_g] = -P \frac{\partial\alpha}{\partial t} - P\nabla(\alpha\vec{v}_g) + q_{wg} + q_{ig} + \Gamma_g h_{o,l} \quad (2.3)$$

- Ecuación de conservación de la energía para la fase líquido:

$$\frac{\partial[(1-\alpha)\rho_l e_l]}{\partial t} + \nabla[(1-\alpha)\rho_l e_l \vec{v}_l] = -P\nabla[(1-\alpha)\vec{v}_l] + q_{wl} + q_{il} + \Gamma_l h_{o,g} \quad (2.4)$$

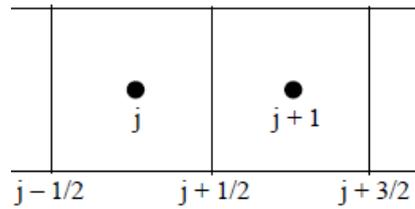
- Ecuación de conservación de momento para la fase gas:

$$\frac{\partial v_g}{\partial t} + \vec{v}_g \nabla \vec{v}_g = -\frac{1}{\rho_g} \nabla P + \frac{[f_{wg} - f_i - \Gamma(\vec{v}_g - \vec{v}_l)]}{\alpha\rho_g} + g \quad (2.5)$$

- Ecuación de conservación de momento para la fase líquido:

$$\frac{\partial v_l}{\partial t} + \vec{v}_l \nabla \vec{v}_l = -\frac{1}{\rho_l} \nabla P + \frac{[f_i - \Gamma(\vec{v}_l - \vec{v}_g) + f_{wl}]}{(1-\alpha)\rho_l} + g \quad (2.6)$$

El código TRACE trabaja con las ecuaciones de conservación anteriores en un sistema de control dividido en volúmenes de control o celdas de tamaño reducido como muestra la figura 2.1, considerando las distintas variables de estado como valores centrados en el volumen de control (j, j+1) y con las velocidades como valores en las caras del volumen de control (j-1/2, j+1/2, j+3/2).



**Figura 2.1 Volúmenes de control o celdas del código TRACE (USNRC, 2017).**

### 3. DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES DE CONSERVACIÓN

En este apartado se describen las discretizaciones realizadas a las ecuaciones de conservación del apartado anterior. La ecuación de conservación de la masa y de la energía se han discretizado integrándolas a lo largo de la longitud  $L$  del sistema, y la ecuación de conservación del momento, mediante el método de volúmenes finitos.

#### 3.1. Discretización de la ecuación de conservación de la masa.

Integrando las ecuaciones 2.1 y 2.2 a lo largo de un sistema de longitud  $L$  y, teniendo en cuenta que la fracción de huecos y la densidad microscópica son constantes en cada volumen de control o celda  $l$ , y que la sección del sistema se mantiene constante, se obtiene:

$$m_k(t) = m_k(0) + \int_0^t \left( \int_0^L A \Gamma_k dx + W_k^0 - W_k^L \right) dt \quad (3.1)$$

Donde:

$$m_k = \int_0^L (\alpha_k A \rho_k) dx \approx \sum_{l=1}^N \int_0^l (\alpha_k A \rho_k) dx = \sum_{l=1}^N (\alpha_k V \rho_k)_l \quad (3.2)$$

$$W_k^0 = (\alpha_k A \rho_k v_k)_0 \quad (3.3)$$

$$W_k^L = (\alpha_k A \rho_k v_k)_L \quad (3.4)$$

El segundo miembro de la ecuación 3.1 se integra en el tiempo mediante una regla trapezoidal de primer orden, comparando el resultado con el obtenido con la ecuación 3.2, para cada fase (líquido y gas).

#### 3.2. Discretización de la ecuación de conservación de la energía.

Integrando las ecuaciones 2.3 y 2.4 a lo largo de un sistema de longitud  $L$  y, teniendo en cuenta que la fracción de huecos y la densidad microscópica son constantes en cada volumen de control o celda  $l$ , y que la sección del sistema se mantiene constante, se obtiene:

$$U_k(t) = U_k(0) + \int_0^t \left( W U_k^0 - W U_k^L - \sum_{l=1}^N P^l V^l \left( \frac{1}{\Delta t} \right) (\alpha_k^{l,n} - \alpha_k^{l,n-1}) - \sum_{l=1}^N P^l [(\alpha_k A \rho_k u_k v_k)_{l_j} - (\alpha_k A \rho_k u_k v_k)_{l_{j-1}}] + \sum_{l=1}^N Energy\ sources_k^l V^l \right) dt \quad (3.5)$$

Donde:

$$U_k = \int_0^L (\alpha_k A \rho_k u_k) dx \approx \sum_{l=1}^N \int_0^l (\alpha_k A \rho_k u_k) dx = \sum_{l=1}^N (\alpha_k V \rho_k u_k)_l \quad (3.6)$$

$$WU_k^L = (\alpha_k A \rho_k u_k v_k)_L \quad (3.7)$$

$$WU_k^0 = (\alpha_k A \rho_k u_k v_k)_0 \quad (3.8)$$

Energy sources son los términos fuente de la ecuación de conservación de la energía.

El segundo miembro de la ecuación 3.5 se integra en el tiempo mediante una regla trapezoidal de primer orden, comparando el resultado con el obtenido con la ecuación 3.6, para cada fase (líquido y gas).

### 3.3. Discretización de la ecuación de conservación de la presión y el volumen.

La ecuación de conservación del volumen y de la presión se deduce de la ecuación de conservación de la energía. Estas ecuaciones sirven para una verificación de la ecuación de conservación de la energía más completa. Para su obtención, se parte de la definición de entalpía:

$$h_k = e_k + P \vartheta_k \quad (3.9)$$

Y se sustituye en la ecuación de conservación de la energía para cada fase (ecuaciones 2.3 y 2.4), obteniendo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_k \rho_k (h_k - P \vartheta_k)}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial (\alpha_k \rho_k (h_k - P \vartheta_k) u_k A)}{\partial x} = \\ = -P \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial (\alpha_k u_k A)}{\partial x} + Energy\ sources_k \end{aligned} \quad (3.10)$$

Utilizando relaciones termodinámicas y operando, se llega a la forma final de la ecuación de conservación del volumen:

$$\frac{dV_k}{dt} = Sw_k - J_k - Ac_k - \frac{dP}{dt} C_k + D_k \quad (3.11)$$

Donde:

$$V_k = \int_0^L \alpha_k A dx \approx \sum_{l=1}^N (\alpha_k A)_l \int_0^L dx = \sum_{l=1}^N (\alpha_k A \Delta x)_l = \sum_{l=1}^N (\alpha_k V)_l \quad (3.12)$$

$$\int_V \frac{\Gamma_k}{\rho_k} dV = \int_0^L \frac{\Gamma_k}{\rho_k} A dx \approx \sum_{l=1}^N \frac{\Gamma_{kl}}{\rho_{kl}} V_l = Sw_k \quad (3.13)$$

$$\int_V \frac{1}{A} \frac{\partial (\alpha_k u_k A)}{\partial x} dVol = \int_0^L \frac{\partial (\alpha_k u_k A)}{\partial x} dx = (\alpha_k A u_k)_L - (\alpha_k A u_k)_0 = J_k \quad (3.14)$$

$$\int_V \alpha_k \gamma_k u_k \frac{\partial P}{\partial x} dV = \int_0^L \alpha_k \gamma_k u_k A \frac{\partial P}{\partial x} dx \approx \sum_{l=1}^N \alpha_{kl} \gamma_{kl} u_{kl} A_l \Delta P = Ac_k \quad (3.15)$$

$$\int_V \alpha_k \gamma_k dVol \approx \sum_{l=1}^N \alpha_{k_l} \gamma_{k_l} V_l = C_k \quad (3.16)$$

$$\int_V (Energy\ sources_k - \Gamma_k h_k) \pi_k dV = \int_0^L (Energy\ sources_k - \Gamma_k h_k) \pi_k A dx$$

$$\approx \sum_{l=1}^N \pi_{k_l} \cdot (Energy\ sources_k - \Gamma_k h_k) V_l = D_k \quad (3.17)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\sum_k (SW_k + D_k - J_k - Ac_k)}{\sum_k C_k} \quad (3.18)$$

Integrando en el tiempo las ecuaciones 3.11 y 2.24, se obtiene:

$$V_k(t) = V_k(0) + \int_t^{\square} \left( SW_k - J_k - Ac_k - \frac{\partial P}{\partial t} C_k + D_k \right) dt \quad (3.19)$$

$$P(t) = P(0) + \int_t^{\square} \left( \frac{\sum_k (SW_k + D_k - J_k - Ac_k)}{\sum_k C_k} \right) dt \quad (3.20)$$

El segundo miembro de la ecuación 3.19 se integra en el tiempo mediante una regla trapezoidal de primer orden, comparando el resultado con el obtenido con la ecuación 3.12, para cada fase (líquido y gas).

El segundo miembro de la ecuación 3.20 se integra en el tiempo mediante una regla trapezoidal de primer orden, comparando el resultado con el obtenido con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\sum_{l=1}^N (V^l \alpha_k^l P^l)}{\sum_{l=1}^N (V^l \alpha_k^l)} \quad (3.21)$$

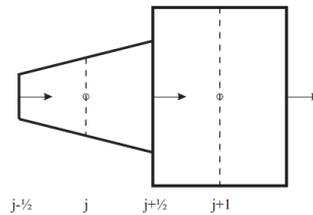
Además, para una correcta conservación del volumen, se tiene que cumplir que la suma del volumen del gas y del líquido sea constante a lo largo del tiempo, y que:

$$\frac{dV_g}{dt} + \frac{dV_l}{dt} = 0 \quad (3.22)$$

### 3.4. Discretización de la ecuación de conservación del momento.

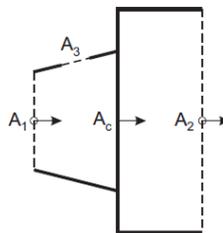
La ecuación de conservación del momento se discretiza mediante el método de volúmenes finitos, diferenciándose del método de discretización utilizado en las ecuaciones de conservación anteriores. Esta diferencia en la discretización está motivada por los volúmenes de control utilizados para cada ecuación de conservación.

La figura 3.1 muestra dos volúmenes de control adyacentes para las ecuaciones de conservación de la masa y la energía, el volumen j (que va desde la cara j-1/2 hasta la cara j+1/2) y el volumen j+1 (que va desde la cara j+1/2 hasta la cara j+3/2).



**Figura 3.1 Dos volúmenes para las ecuaciones de masa y energía ( $j$  y  $j+1$ ) (USNRC, 2017).**

En cambio, el volumen de control empleado para la ecuación de conservación del momento el mostrado en la Figura 3.2, donde la superficie  $A_1$  coincide con  $j$  y  $A_2$  con  $j+1$  en la figura 1, cuyo centro es  $j+1/2$ .



**Figura 3.2 Volumen de control para la ecuación del momento (USNRC, 2017).**

Las variables de estado son valores promediados constantes para cada volumen de las ecuaciones de masa y energía (tomados estos valores en el centro del volumen) mientras que las velocidades se toman en las caras de dichos volúmenes.

Sin embargo, dado el volumen de control del momento, las variables de estado se encuentran en las caras de los volúmenes de masa y energía mientras que las velocidades se toman en el centro de dichos volúmenes. Además, la presión se toma en las caras del volumen del momento.

Para calcular las velocidades en las caras del volumen de control del momento se considera el caudal constante, teniendo en cuenta de esta manera los cambios en la sección del volumen de control:

$$v_{j+1} = \frac{A_{j+1/2}}{A_{j+1}} v_{j+1/2} ; v_j = \frac{A_{j-1/2}}{A_j} v_{j-1/2} \quad (3.23)$$

$$v_{g,1} = \frac{A_c}{A_1} v_{g,c} ; v_{g,2} = \frac{A_c}{A_2} v_{g,c} \quad (3.24)$$

Siendo la forma final de la ecuación de conservación del momento después de realizar el método de los volúmenes finitos:

$$\begin{aligned} (P_r - P_l) = & -\frac{(\overline{\alpha\rho_g}) \Delta z}{\bar{\alpha}} \left( \frac{\delta v_{g,c}}{\delta t} \right) - \frac{1}{\bar{\alpha}} (v_{g,2} - v_{g,1}) (\overline{\alpha\rho_g}) v_{g,c} \\ & + \frac{\Delta z}{\bar{\alpha}} \left[ \bar{f}(v_i - v_g)_c - (f_i + f_{wg})_c \right] - \frac{(\overline{\alpha\rho_g}) \Delta z}{\bar{\alpha}} g \cos(\theta) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Donde:

$$\frac{[(\alpha \Delta z)_l + (\alpha \Delta z)_r]}{\Delta z} = \overline{(\alpha)} \quad (3.26)$$

$$\frac{[(\alpha \rho_g \Delta z)_l + (\alpha \rho_g \Delta z)_r]}{\Delta z} = \overline{(\alpha \rho_g)} \quad (3.27)$$

$$\frac{[(\Gamma \Delta z)_l + (\Gamma \Delta z)_r]}{\Delta z} = \overline{\Gamma} \quad (3.28)$$

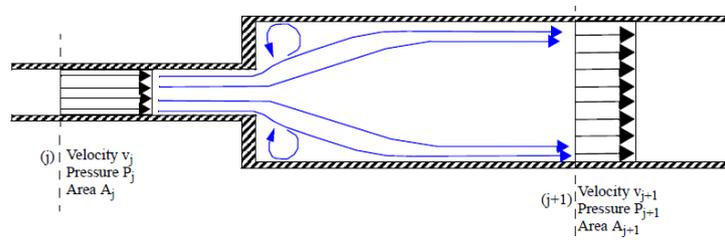
La derivada temporal del primer término de la parte derecha de la ecuación 3.25 se aproxima por diferencias finitas:

$$\left( \frac{\delta v_{g,c}}{\delta t} \right) = \frac{v_{g,c}^{n+1} - v_{g,c}^n}{\Delta t} \quad (3.29)$$

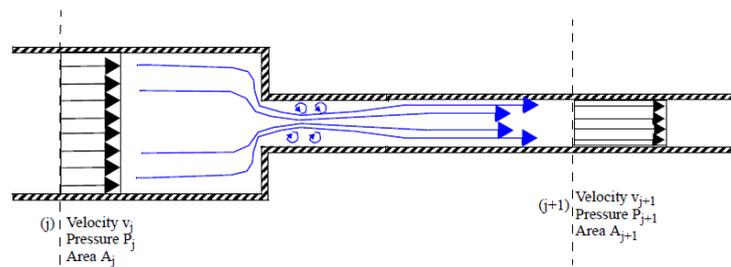
Y la velocidad interfacial es:

$$v_i = \begin{cases} v_g, & \overline{\Gamma} < 0 \\ v_l, & \overline{\Gamma} \geq 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

La ecuación de conservación del momento no está completa, ya que falta incluir los términos de pérdidas producidas por un cambio brusco en la sección de la tubería (contracción o expansión). Estas pérdidas se componen de la caída de presión reversible provocada por el cambio en la sección y por la caída de presión irreversible derivada de la generación de turbulencia en el flujo, como muestran las figuras 3.3 y 3.4:



**Figura 3.3 Expansión (USNRC, 2017).**



**Figura 3.4 Contracción (USNRC, 2017).**

La variación de presión reversible se calcula con la ecuación de Bernoulli para una sola fase, obteniendo:

$$\Delta P_{Rev} = \frac{1}{2} \rho_k (1 - \sigma^2) v_{k,1} |v_{k,1}| = \begin{cases} > 0 & , A_1 < A_2 \\ < 0 & , A_1 > A_2 \end{cases} \quad (3.31)$$

Donde:

$$\sigma = \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (3.32)$$

La caída de presión irreversible tiene la forma de Bernoulli, multiplicando por un factor k, el cual dependerá de la geometría de la expansión/contracción:

$$\Delta P_{Irrev} = \frac{1}{2} \rho_k k_{factor} v_{k,f} |v_{k,f}| \quad (3.33)$$

Siendo:

$$k_{factor} = \begin{cases} (1 - \sigma)^2 & , A_1 < A_2 \\ \left[ 0.5 - \frac{1}{\sigma} * 0.7 + \left( \frac{1}{\sigma} \right)^2 * 0.2 \right] & , A_1 > A_2 \end{cases} \quad (3.34)$$

$$f = \begin{cases} 1 & , A_1 < A_2 \\ 2 & , A_1 > A_2 \end{cases} \quad (3.35)$$

La caída de presión reversible e irreversible planteadas, no se validan con datos experimentales cuando el flujo es bifásico. Por ello, se multiplican por un multiplicador, llamado multiplicador bifásico. El multiplicador que utiliza el código TRACE es el multiplicador bifásico homogéneo:

$$\Phi_{hom}^2 = \frac{\rho_l}{\rho_m} \quad (3.36)$$

Siendo la forma final de las pérdidas de presión reversible e irreversible para flujo bifásico:

$$\Delta P_{Rev} = \frac{1}{2} \rho_k (1 - \sigma^2) \left( \frac{A_c}{A_1} \right)^2 v_{k,c} |v_{k,c}| \Phi_{hom}^2 \quad (3.37)$$

$$\Delta P_{Irrev} = \frac{1}{2} \rho_k k_{TRACE} v_{k,c} |v_{k,c}| \Phi_{hom}^2 \quad (3.38)$$

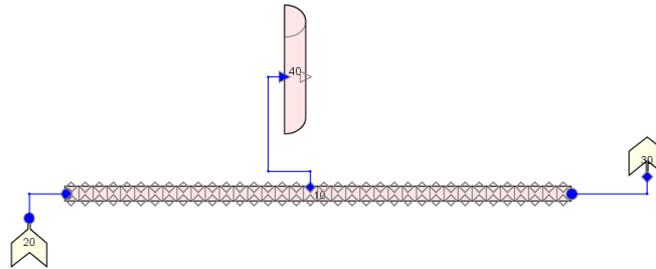
## 4. ENSAYO Y RESULTADOS

En este apartado se van a mostrar los modelos utilizados para la verificación de las ecuaciones de conservación empleadas por el código TRACE, comparando los resultados obtenidos por el código TRACE (TRACE) con los conseguidos con la herramienta de verificación (Herramienta). La comparación de los resultados se realiza con la siguiente fórmula:

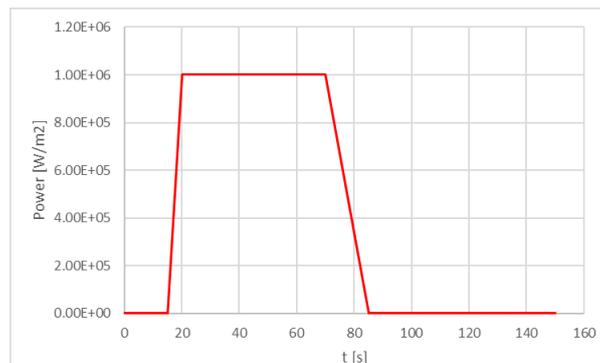
$$Error = \frac{(Herramienta - TRACE)}{TRACE * 100} [\%] \quad (4.1)$$

El ensayo realizado consiste en una tubería cerrada, dividida en 36 celdas, como muestra la figura 4.1. Además, se calientan todas las celdas con una estructura de calor que le introduce a cada celda una potencia de  $10^6$  W/m<sup>2</sup> de la forma que indica la figura 4.2.

La tubería es de 10 m de longitud con un volumen total de 10 m<sup>3</sup> y una sección constante de 1 m<sup>2</sup>, siendo cada celda de 0.2778 m de longitud, 0.2778 m<sup>3</sup> de volumen y 1 m<sup>2</sup> de sección. La tubería es adiabática, es decir, no se transmite energía de la tubería al exterior.



**Figura 4.1 Componentes: PIPE (10), FILL (20), BREAK (30) y HEAT STRUCTURE (40).**



**Figura 4.2 Salto de potencia.**

Se observa un aumento de la energía de la fase gas (Figura 4.3) y una disminución de la energía del líquido (Figura 4.4), así como una energía total constante a lo largo del tiempo (Figura 4.5), tal y como se esperaba.

Sin embargo, una vez se deja de introducir energía al sistema, la energía del vapor disminuye (figura 4.3) y la energía del líquido aumenta (figura 4.4), manteniéndose la energía total del sistema constante (figura 4.5). Esta transmisión de energía es debida a que el líquido, aunque caliente, aún posee capacidad para absorber más energía, la cual obtiene del vapor. Al perder energía, el vapor se condensa, aumentando de esta forma la masa del líquido y disminuyendo la de vapor.

Esta transmisión de energía se comprueba mediante la conservación de la masa y del volumen:

Al introducir energía al sistema, la masa de la fase gas aumenta (figura 4.7) y la masa de líquido disminuye (figura 4.8), pero no se mantienen constantes una vez se deja de introducir energía al sistema. Estas variaciones concuerdan con la disminución de energía del vapor y el aumento de energía del líquido.

En cuanto a la conservación del volumen, el volumen de vapor aumenta y el de líquido disminuye mientras se introduce energía al sistema. Una vez se deja de introducir energía al sistema, el volumen de vapor disminuye y el de líquido aumenta. Este aumento y esta disminución son proporcionales, como se puede observar en la figura 4.11.

Esta proporcionalidad concuerda con la conservación del volumen, al tener que ser el volumen total de la mezcla constante en el tiempo (figura 4.12).

Además, tiene coherencia con una variación del volumen de las fases respecto al tiempo igual y de signo contrario (figura 4.13).

La presión del sistema aumenta al introducir energía al mismo. Sin embargo, la presión se va reduciendo una vez se deja de introducir energía al sistema (figura 4.15).

A continuación, se analiza los errores obtenidos comparando los valores de la herramienta de verificación con los valores del TRACE.

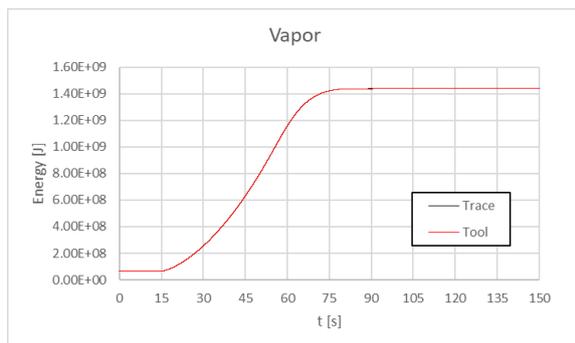
El error obtenido en la masa de cada una de las fases (vapor, líquido) y en la masa total del sistema son inferiores a un 0.03% (figura 4.6).

El error obtenido en la energía de cada una de las fases (vapor, líquido) y en la energía total del sistema son inferiores a un 0.03% (figura 4.10).

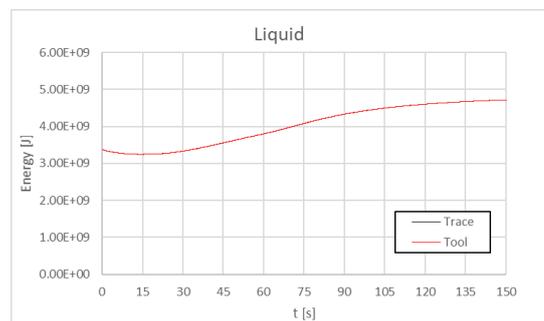
El error en el volumen de cada fase es de un 0.005%, siendo el error de un 0.00% en el volumen total del sistema, el cual es igual en el código TRACE y en la herramienta (figura 4.14).

El error obtenido en la verificación de la presión del sistema es de un 0.08% (figura 4.16).

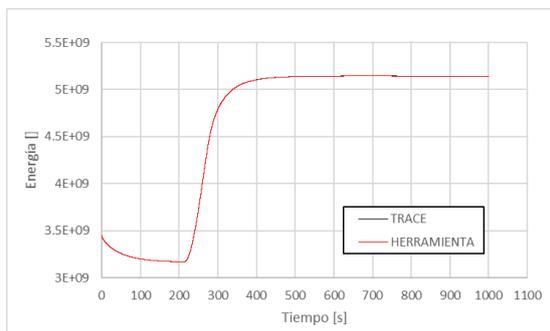
El término que más influye en la ecuación del volumen para el caso de estudio (compresión por calentamiento en tubería cerrada y adiabática) es el término de generación/pérdida de una de las fases Sw/C (figura 4.17).



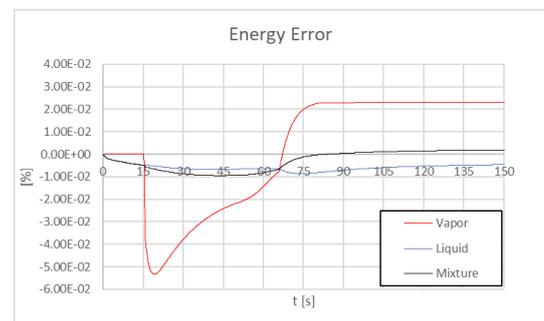
**Figura 4.3 Energía fase gas.**



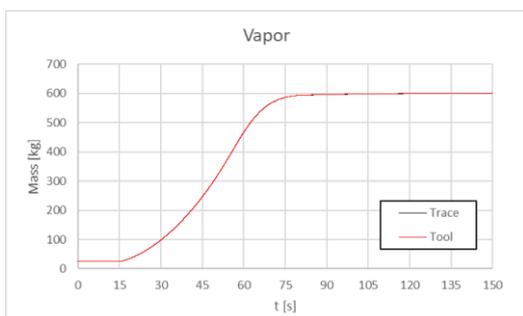
**Figura 4.4 Energía fase líquido.**



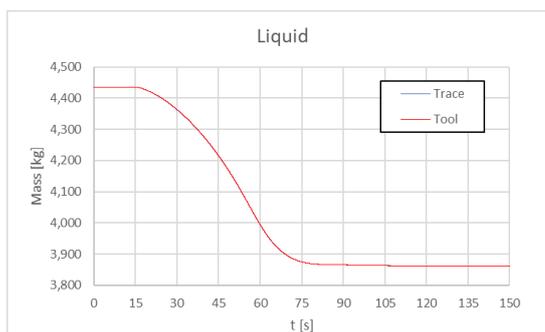
**Figura 4.5 Energía total.**



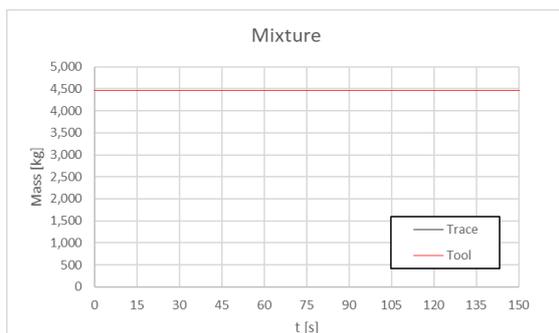
**Figura 4.6 Error de la energía.**



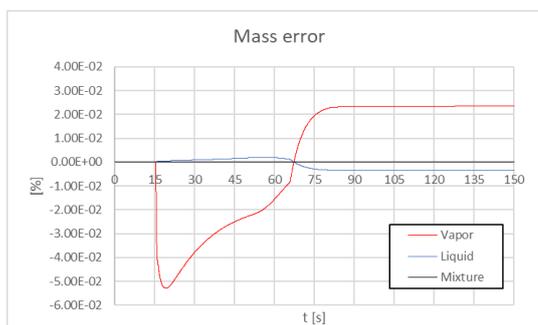
**Figura 4.7 Masa fase gas.**



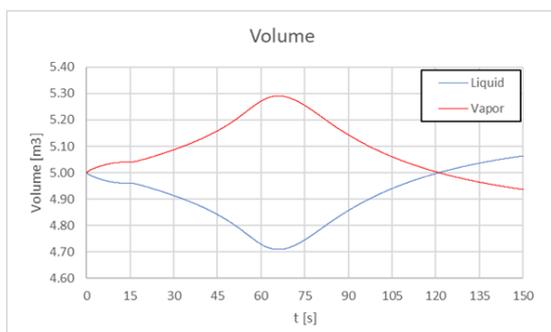
**Figura 4.8 Masa fase líquido.**



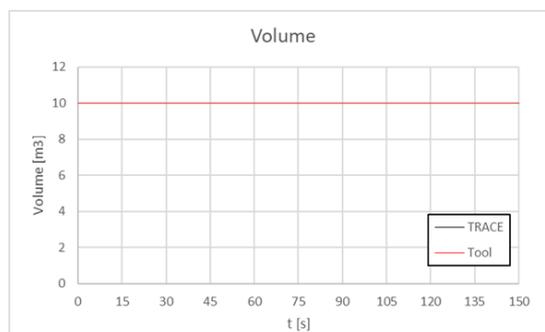
**Figura 4.9 Masa total.**



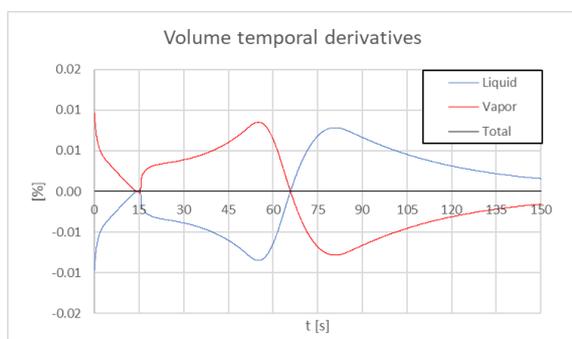
**Figura 4.10 Error de la masa.**



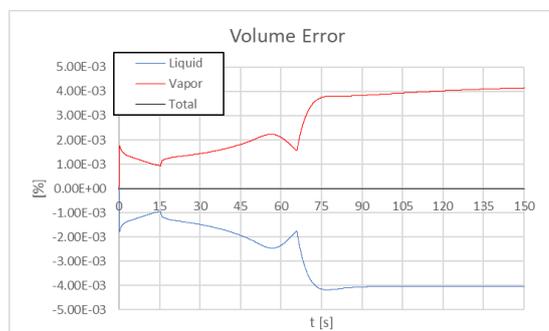
**Figura 4.11 Volumen fase gas y fase líquido.**



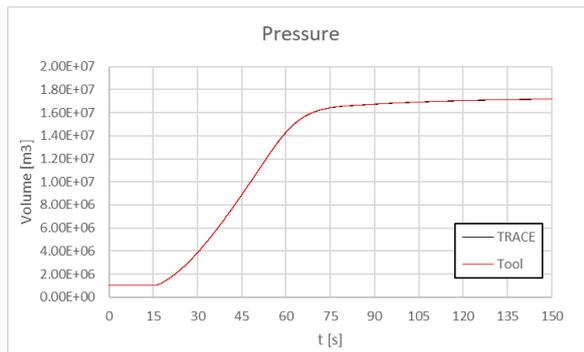
**Figura 4.12 Volumen total.**



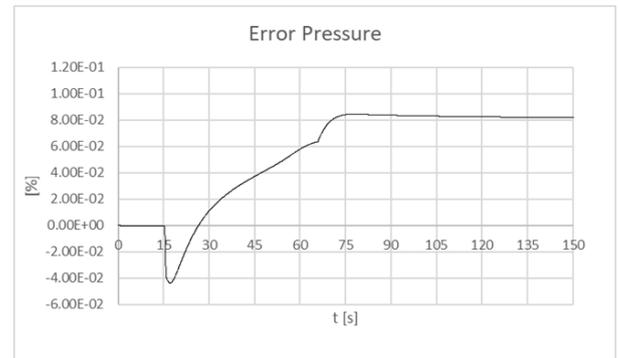
**Figura 4.13 Derivadas temporales del volumen de la fase gas y de la fase líquido.**



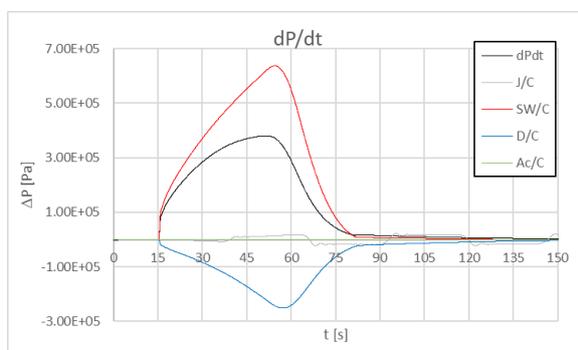
**Figura 4.14 Error del volumen.**



**Figura 4.15 Presión total.**



**Figura 4.16 Error de la presión total.**



**Figura 4.17 Términos ecuación de la presión.**

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios, alcanzándose un muy buen seguimiento de los resultados del código TRACE con los de la herramienta de verificación desarrollada. Además, se han obtenido resultados lógicos y coherentes entre las distintas ecuaciones de conservación, avanzando de esta manera en la validación del código TRACE y, por consiguiente, en su desarrollo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) su ayuda dentro del proyecto CAMP-España.

## REFERENCIAS

USNRC, 2017. TRACE v5.0 patch 5 Theory manual. Año 2017.