

## COMPARACIÓN DE UN MODELO DE CANAL INDIVIDUAL Y CÁLCULO DE DNB UTILIZANDO LOS CÓDIGOS DE SISTEMAS TRACE5 Y RELAP5

### COMPARISON OF A DNB CALCULATION IN A SINGLE CHANNEL MODEL USING SYSTEM CODES TRACE5 AND RELAP5

Juan P. Messiga<sup>a</sup>, Ricardo Ugarte<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), Av. Del Libertador 8250, C1429PNB CABA, Argentina,*  
[jmessiga@arn.gob.ar](mailto:jmessiga@arn.gob.ar), <https://www.argentina.gob.ar/arn>

**Palabras clave:** Reactores nucleares, Cálculo termo-hidráulico, RELAP5, TRACE5.

**Resumen.** TRACE5 y RELAP5 son códigos de cálculo utilizados para el análisis del comportamiento termo-hidráulico de reactores nucleares. Si bien persiguen objetivos similares, los mismos presentan diferencias en las metodologías de cálculo, métodos numéricos, lógica de cálculo y las correlaciones utilizadas, además de sus componentes hidráulicos y las opciones de usuario. Uno de los fenómenos que estos códigos permiten calcular, y que son de importancia desde el punto de vista de la seguridad nuclear, es el apartamiento a la ebullición nucleada (DNB). En este trabajo se realizó el cálculo de la misma y de los perfiles de temperatura y presión para dos modelos independientes del mismo canal individual de una central nuclear PHWR en RELAP5 y TRACE5. Dado que en ambos cálculos se utiliza la misma geometría y condiciones de contorno, se espera que las diferencias estén asociadas a las diferentes metodologías de cálculo, opciones de usuario y, fundamentalmente, los métodos numéricos utilizados. El objetivo fue comparar la consistencia de los resultados obtenidos, verificar la capacidad de dichos códigos para reproducir la fenomenología termo-hidráulica en dicho canal y analizar el impacto que pueden tener las opciones de usuario de cada código.

**Keywords:** Nuclear reactor, Thermohydraulic calculation, RELAP5, TRACE5.

**Abstract.** System codes TRACE5 and RELAP5 are used for predicting and analyzing the thermohydraulic behaviour of nuclear reactors. Although being used for the same purposes, they differ in their calculation methodologies, numerical methods, algebraic correlations, hydraulic components and user options. In some applications, these codes calculate the Departure from Nucleate Boiling (DNB), which is one of the most important phenomena which may occur in a nuclear reactor and it is highly relevant for nuclear safety. In this work, both codes are used to calculate the DNB Ratio and the pressure and temperature profiles of the same PHWR single channel model. In both cases, the same geometry and boundary conditions were used so the differences in the results are attributed to the numerical methodologies, user functions and, most important, the numerical methods of each code. This work aims to compare the consistency of the results obtained, analyze the capability of each code to reproduce the thermohydraulic methodology and analyze the impact of user options in the results.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los programas RELAP5 y TRACE5 son códigos de sistemas utilizados para simular transitorios y accidentes en reactores nucleares ([Nuclear Systems Analysis Operations, Information Systems Laboratories, 2010](#) y [Division of System Analysis, U.S.NRC, 2013](#)). Los mismos han sido utilizados especialmente para modelar centrales nucleares ([Allison, C. M., Hohorst, J. K., 2010](#) y [Corzo, S. F.; Ugarte, R.; Godino, D. M.; Ramajo, D. E., 2023](#)). A pesar de que ambos programas se utilizan con el mismo objetivo, presentan diferencias en cuanto a las opciones de usuario, la metodología de cálculo y particularmente en las correlaciones utilizadas y los métodos de resolución numérica utilizados. Debido a su versatilidad, permiten analizar distintas fenomenologías que pueden presentarse en un reactor nuclear, como el DNB (apartamiento a la ebullición nucleada) y la distancia con la que se opera respecto a éste parámetro.

En este trabajo se modeló un canal individual de una central PHWR utilizando ambos códigos con el fin de determinar las diferencias en los resultados y DNBR (margen al fenómeno de DNB). Es decir que los dos modelos comparten la misma geometría y condiciones de contorno, pero difieren en las correlaciones utilizadas y sus métodos de resolución numérica, a lo que se atribuyen las diferencias en los resultados. Como en ambos modelos se calcula el DNBR, se pudo analizar como las diferencias en los resultados impactan en la predicción de dicha fenomenología. Esto es de vital importancia desde el punto de la seguridad nuclear ya que dicho fenómeno no debería ocurrir y la predicción de dicho margen debería ser similar en ambos códigos.

Además de analizar las diferencias en los resultados de las variables de proceso como temperatura, presión o fracción de vacío, se analizaron las variables numéricas tales como el tiempo de cómputo o el paso de tiempo, en el cual se observaron diferencias significativas. Por otro lado, se observó la presencia de oscilaciones de origen numérico en variables de proceso al utilizar determinados inputs de entrada.

## 2. MÉTODOS NUMÉRICOS Y CORRELACIONES DE TRACE5 Y RELAP5

TRACE5 es un código unidimensional que resuelve las ecuaciones de balance de masa, energía y cantidad de movimiento utilizando el método de volúmenes finitos para sistemas de una o dos fases ([Division of System Analysis, U.S.NRC, 2013](#)). Las ecuaciones de masa y energía tienen en cuenta la transferencia de estas entre dos fases, el calor generado dentro de cada fase, la transferencia de calor en las paredes y el calor por fricción en las bombas, entre otros fenómenos. La ecuación de cantidad de movimiento tiene en cuenta la fricción entre fases, la de cada una de ellas con las paredes, la transferencia de cantidad de movimiento asociada a la transferencia de masa entre líquido y vapor, la gravedad, etc.

Este código utiliza el método de resolución numérica de volúmenes finitos y permite que el usuario determine un paso de tiempo máximo y mínimo. El programa toma el paso de tiempo más alto y, en caso de no producirse la convergencia, lo reduce sucesivamente. En cuanto a la determinación de las pérdidas de carga, utiliza la correlación de Churchill, la cual brinda resultados razonables para régimen transitorio y turbulento ([Division of System Analysis, U.S.NRC, 2013](#)). Para la transferencia de calor entre la pared y el líquido, dispone de la correlación de Gnielinski (la cual requiere el cálculo del coeficiente de fricción, el cual se realiza con la fórmula de Filoshenko, [Division of System Analysis, U.S.NRC, 2013](#)). Por otro lado, para

flujo de dos fases, TRACE5 usa un enfoque en el cual calcula por separado el flujo de calor correspondiente a convección forzada en dos fases (con la correlación de Nusselt, [Noori, R.M., Saeed, A.F, 2013](#), y el factor de Martinelli, [Holland, Bragg, 1995](#)) y el flujo correspondiente a “pool boiling”, para el cual tiene la correlación de Gorenflo, [Leiner, 2024](#).

RELAP5 ([Nuclear Systems Analysis Operations, Information Systems Laboratories, 2010](#)) es un código unidimensional que resuelve un sistema de ecuaciones de flujo de dos fases cuasi lineales que incorpora fenómenos que tienen grandes variaciones en la constante de tiempo asociada. La constante de tiempo más pequeña está asociada con la interfaz transferencia de energía y masa. Estos procesos están estrechamente relacionados con los campos de presión y energía y, en cierta medida, se comportan como términos fuente en las ecuaciones. La siguiente constante de tiempo más rápida está asociada con relajación de las ondas de tensión propagadas en relación con el fluido a la velocidad del sonido. La constante de tiempo más grande es asociada con la convección de masa y energía propagada con la velocidad del material.

Estas constantes de tiempo afectan el desarrollo de un proceso numérico de maneras ligeramente diferentes. El efecto de transferencia de masa da como resultado un sistema rígido y requerirá, para mayor precisión, que los términos fuente asociados con transferencia de masa se evaluará implícitamente (en términos de las variables dependientes en el nuevo nivel de tiempo). Los efectos propagados, dan como resultado límites de paso de tiempo tipo Courant para la diferenciación explícita de los términos rectores. de las ecuaciones. Generalmente, la resolución detallada de las ondas de tensión no será de interés y, por tanto, Será deseable un tratamiento implícito de estos términos para eliminar el límite de Courant de la velocidad del sonido.

El esquema de diferenciación semi-implícito tiene esta propiedad y el paso de tiempo permitido está limitado por el Límite de Courant Material. Si se desea, este proceso se puede llevar un paso más allá. El límite material de Courant puede ser eliminados mediante el uso de esquemas más implícitos. En este último caso existen dos métodos que no son materiales Paso de tiempo de Courant limitado. Estos son los esquemas casi implícitos ([Mahaffy 1982](#)) y los esquemas totalmente implícitos ([Micaelli 1987](#)). Por lo tanto, Los esquemas numéricos de mayor interés, son los semiimplícitos y aquellos con suficiente implícitaidad para eliminar el límite material de Courant. Los códigos RELAP5 utilizan sólo métodos semi-implícitos y casi implícitos ([Ransom et al. 1985](#)).

Otro aspecto de los métodos numéricos para el flujo de dos fases, que también se consideró en el desarrollo de métodos para el sistema lineal, es el uso de rejillas escalonadas. Este enfoque evoluciona naturalmente cuando las ecuaciones de conservación se consideran en sentido integral. Las variables de masa y energía o Se considera que los escalares existen en los centros celulares. Las velocidades aparecen en términos de flujo en los bordes de la celda. Los modelos de dos fluidos que se han desarrollado para el uso seguro de LWR se basan en este método de construcción. ecuaciones en diferencias.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE CANAL INDIVIDUAL

El modelo de canal individual corresponde al de una central nuclear tipo PHWR operando a potencia constante. El mismo consta de una condición de borde en la zona inferior que representa el “lower plenum” y otro volumen para el “upper plenum”. Ambos se encuentran a presión y temperatura constante. Un esquema del modelo se presenta a continuación, representado por la interfaz gráfica de RELAP5, llamada SNAP:

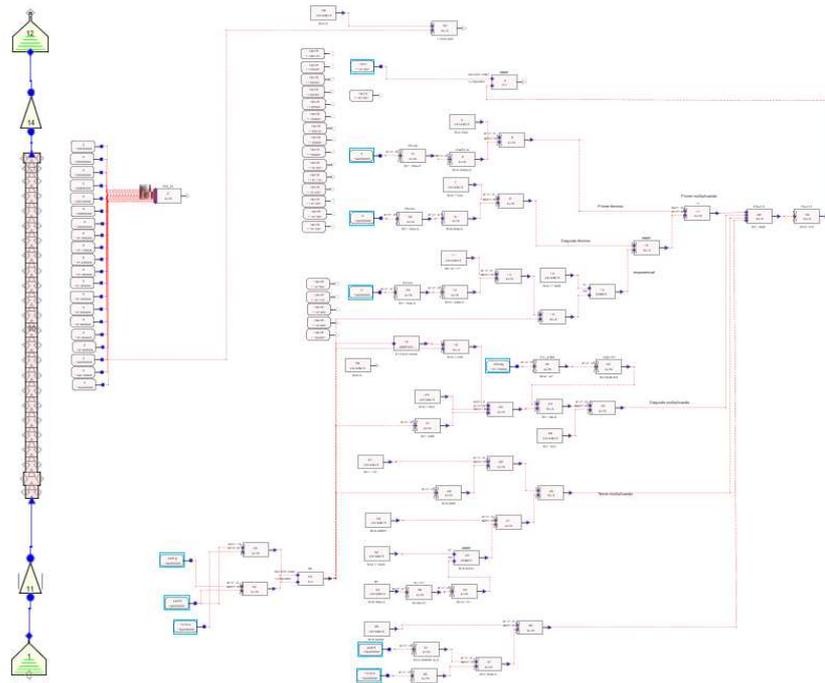


Figura 1: Representación gráfica del modelo.

La condición de contorno inferior permite fijar un caudal que circulará por el canal, además de su presión y la temperatura (La fracción de vacío de entrada es nula ya que el refrigerante ingresa subenfriado). La condición de contorno superior permite establecer las condiciones de presión y temperatura correspondiente al plenum superior. Un resumen de las mismas se presenta a continuación:

Entrada (plenum inferior)			Salida (plenum superior)		Potencia del canal
Caudal	Presión	Temperatura	Presión	Temperatura	
kg/s	bar	°C	bar	°C	MW
25	123	276	117	311	6,37

Tabla 1: Condiciones de contorno.

Uno de los parámetros que se analizó en este trabajo es la determinación del flujo de calor crítico (CHF) y su margen, llamado DNBR. Para una posición determinada del canal, se utiliza la correlación W-3 (Palao, C.M., Cuervo Gomez, D., 2015) para calcular el flujo crítico. Además, el margen puede calcularse como la relación entre este y el flujo de calor en la posición del canal. RELAP5 es un código de sistemas versátil que permite incorporar bloques para medir determinadas variables (presión, temperatura y fracción de vacío, por ejemplo) en el canal y luego utilizar estos valores para calcular el flujo crítico y su margen en cada posición del canal. El esquema de bloques que se presenta en la Figura 1 fue creado para realizar esto mismo utilizando la correlación W-3.

SNAP tiene una opción que permite tomar un modelo de RELAP5 y convertirlo a TRACE5. Esto permitió obtener una versión del modelo para este código. Esta conversión permite conservar la misma geometría, condiciones de contorno, pasos de tiempo, estructuras de calor, etc. Los diagramas de bloques también son convertidos pero dado que los de TRACE son distintos a los de RELAP, esta parte del modelo tuvo que adaptarse manualmente. En particular, como la versión de TRACE que se disponía no dispone de un bloque para medir la entalpía de

saturación de las fases líquido y vapor, se interpoló la misma utilizando los datos de NIST ([NIST Webbook, 2024](#)).

Este mismo modelo se corrió para comparar los resultados de RELAP5 y TRACE5, además de las variables numéricas como el paso de tiempo, el tiempo de cómputo, etc.

#### 4. RESULTADOS DEL PERFIL DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y FRACCIÓN DE VACÍO (ANÁLISIS ESTÁTICO)

Se utilizó cada modelo con la misma nodalización, condiciones de contorno e intervalo de salto temporal para calcular el perfil de temperatura, presión y fracción de vacío. A pesar de que se utilizan distintas correlaciones, los perfiles de temperatura y presión son muy similares. Los mismos se presentan en las dos figuras que siguen. En ellas, la posición 0 en abscisas corresponde a la zona inferior del canal.

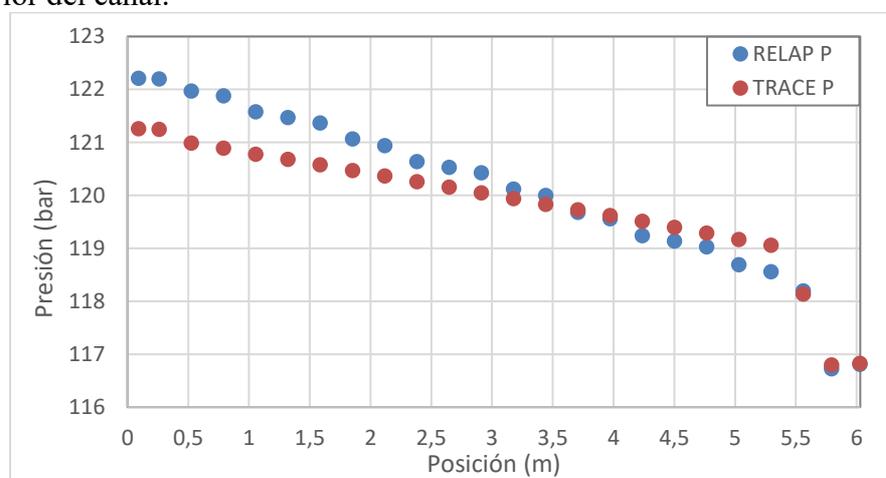


Figura 2: Perfil de presión en el canal individual.

En la Figura 2 se observa que el perfil de presión de RELAP (azul) tiene una pendiente mayor que la de TRACE (rojo). Sin embargo, si se comparan los valores de presión para cada posición, se observa que las diferencias son menores a 1 bar. En resumen, la caída de presión calculada por RELAP5 en el canal es mayor que la predicha por TRACE. Dependiendo del escenario de análisis, esta diferencia puede o no ser importante dependiendo del código utilizado.

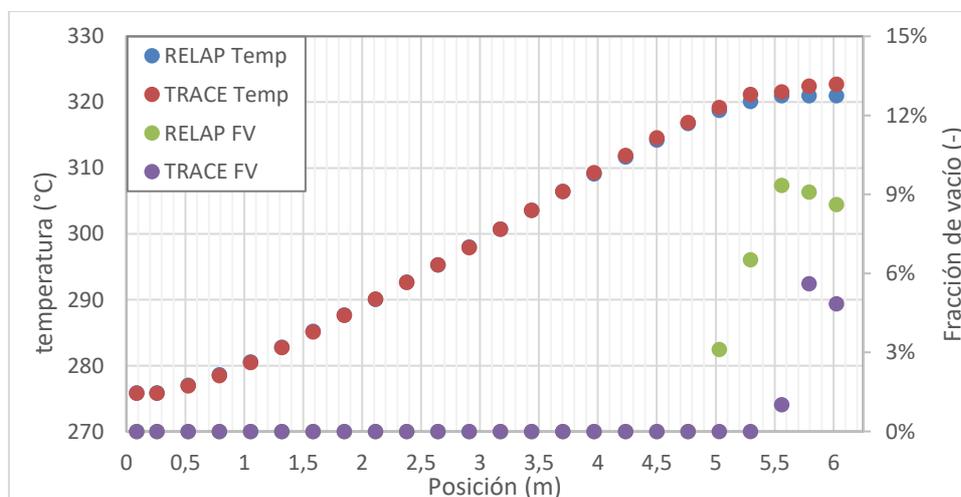


Figura 3: Perfil de temperatura y fracción de vacío en el canal individual.

En cuanto al perfil de temperatura (azul para RELAP y rojo para TRACE), las diferencias observadas son mínimas. Solo se encuentran pequeñas discrepancias en la zona superior del canal a partir de los 5m. Estas diferencias se atribuyen a que RELAP5 y TRACE utilizan distintas temperaturas de saturación lo que implica que se produzca más vapor y este aparezca antes. Este se presenta a partir de los 5 metros en RELAP y los 5,5 metros para TRACE. Además, RELAP predice una fracción de vacío mayor, la cual llega a 9%, mientras que TRACE predice solo un 6%.

Se concluye que estas diferencias son poco significativas ya que hay una diferencia de solo 3% como máximo. En conclusión, las pequeñas diferencias en la temperatura y fracción de vacío se atribuyen a las tablas utilizadas.

## 5. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL DNB

Con el caudal de refrigerante y los perfiles de temperatura, presión y fracción de vacío se determinaron los CHF y el margen al DNB para cada posición (volumen de control) del canal. Para el CHF se utilizó la correlación W-3 y el DNB fue calculado utilizando su definición, donde  $q_{CHF}$  es el CHF y  $q_{(r)}$  es el flujo de calor para una posición dada:

$$DNBR = \frac{q_{CHF}}{q_{(r)}} \quad (1)$$

Donde  $q_{CHF}$  es obtenida en cada código de diferente manera en función de las herramientas disponibles. En RELAP5 se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{q_{CHF}}{10^6} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (2)$$

$$K_1 = [(2,022 - 0,0004302 \cdot p) + (0,1722 - 0,0000984 \cdot p)] \cdot e^{(18,177 - 0,004129 \cdot p)x_e} \quad (3)$$

$$K_2 = (0,1484 - 1,596 \cdot x_e + 0,1729 \cdot x_e \cdot |x_e|) \cdot \frac{G}{10^6} + 1,037 \quad (4)$$

$$K_3 = (1,157 - 0,869 \cdot x_e) \cdot [0,2664 + 0,8357 \cdot e^{(-3,151 \cdot D_h)}] \quad (5)$$

$$K_4 = [0,8258 + 0,000794 \cdot (h_{sat} - h_{in})] \quad (6)$$

Donde,

$p$	Presión del canal ( <i>psia</i> )
$x_e$	Título termohidráulico (-)
$G$	Flujo másico ( <i>lb/hr.ft<sup>2</sup></i> )
$D_h$	Diámetro calefactor ( <i>in</i> )
$h_{sat}$	Entalpía de saturación ( <i>BTU/lb</i> )
$h_{in}$	Entalpía de entrada ( <i>BTU/lb</i> )

Mientras que en TRACE el cálculo de  $h_{sat}$ ;  $h_{in}$  y  $x_e$  se realizaron como sigue:

$$h_{sat}(T_{sat}) = 5.1867 * T_{sat} - 260.78 \quad (7)$$

$$h_{in}(T_{in}) = 5.1867 * T_{in} - 260.78 \quad (8)$$

$$x_e = \frac{h_{VC}(T_{VC}) - h_{L-sat}(T_{sat})}{h_{v-sat}(T_{sat}) - h_{L-sat}(T_{sat})} \quad (9)$$

Donde:

$h_{BC}$  = entalpia del volumen de control a la temperatura del volumen de control

$h_{L-VC}$  = entalpia del liq. del VC (volumen de control) a la temperatura de saturación

$h_{V-VC}$  = entalpia del vapor del VC a la temperatura de saturación

Los resultados de DNBR y CHF se presentan en la Figura 4. En la zona de salida del reactor, ubicada aproximadamente a los 6 metros, dichos resultados coinciden para ambos cálculos. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia a la salida del canal, se observa una mayor discrepancia entre ambos cálculos.

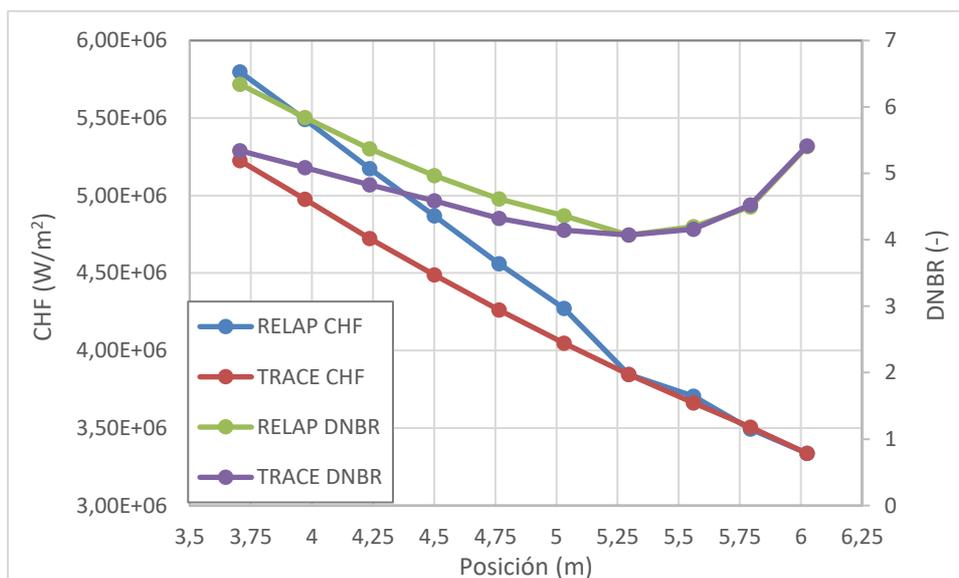


Figura 4: Perfil de temperatura y fracción de vacío en el canal individual.

Se observó que esta diferencia se debe a factores de la correlación W-3 que dependen de las propiedades del refrigerante. Más particularmente, a la forma en que se determinó la entalpía en cada modelo. En el caso de RELAP se determinaron las propiedades utilizando las tablas propias del código. En cambio, TRACE no dispone de un bloque (llamado signal variable) para calcular la entalpía de saturación de las dos fases. Esto llevó a que se tenga que calcular las entalpías correlacionando los datos de NIST por medio de la temperatura de cada volumen de control. Dichas correlaciones se presentan a continuación y abarcan un rango de temperaturas de 270 °C a 320 °C:

$$H_L(T_L) = 5.1867 * T_L - 260.78 \quad (10)$$

$$H_V(T_V) = -0.0193 * T_V^2 + 9.7438 * T_V + 1358.4 \quad (11)$$

En conclusión, sería deseable que TRACE disponga de una lista de “signal variables” como tiene el código RELAP.

## 6. ANALISIS DE LAS VARIABLES NUMÉRICAS

Dado que las variables numéricas como el tiempo de cómputo o el paso de tiempo suelen ser de gran importancia al correr un accidente, las mismas fueron analizadas.

Tanto TRACE como RELAP determinan el paso de tiempo de modo de lograr la convergencia. Es decir, seleccionan un paso de tiempo y si no se logra la convergencia, el cálculo se repite con un paso de tiempo menor. Es por esto que estos códigos permiten introducir un paso de tiempo máxima y mínimo (con el cual, si el cálculo no converge, la simulación se interrumpe). De modo que los resultados de ambos modelos sean comparables se utilizaron los mismos pasos de tiempo, siendo estos  $10^{-6}$  y 10 segundos. Estos son los valores por default que utilizan ambos códigos.

En el modelo de RELAP se observó que se utilizó un paso de tiempo de 0,02 segundos mientras que TRACE utiliza uno de 10 segundos. Además, ya que ambos modelos se corrieron por 5000 segundos, RELAP requirió un total de aproximadamente  $2,5 \cdot 10^5$  pasos de tiempo mientras que TRACE utilizó solo 1400.

En cuanto al tiempo de cómputo, TRACE requirió solo 1,26 segundos para completar el cálculo mientras que RELAP utilizó 65 segundos. Esto implica que TRACE fue 52 veces más rápido, pero esto no significa que para un dado accidente se conserve esta proporción. Esta diferencia se debe a los pasos de tiempo elegidos y no a las condiciones iniciales utilizadas. Esto se puede comprobar en la siguiente figura.

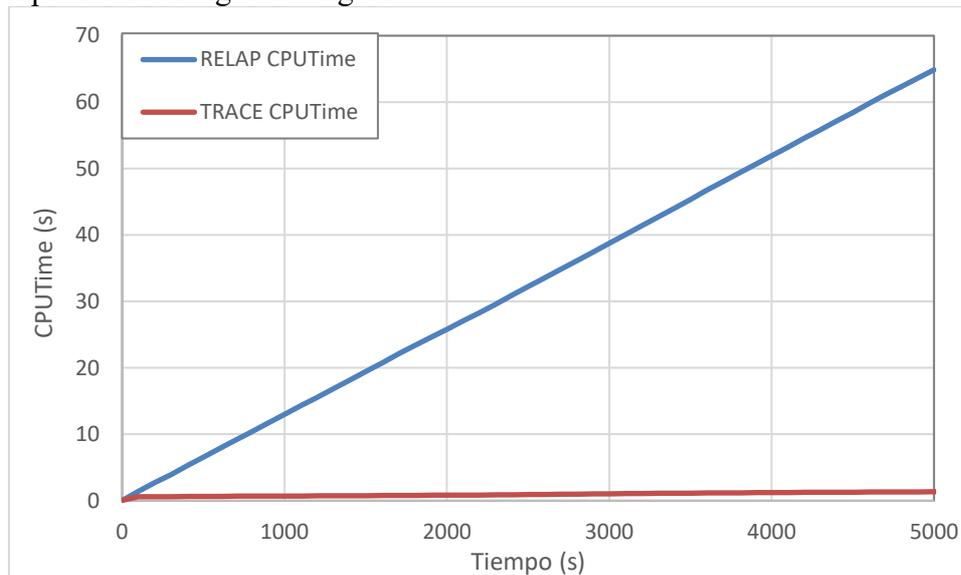


Figura 5: Tiempos de cómputo para ambos códigos.

## 7. CONCLUSIONES

- Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos por un modelo de canal individual en RELAP5 y TRACE5. Se comprobó que el perfil de temperatura de ambos es muy similar, observándose solo pequeñas diferencias en la salida. En cuanto al perfil de presión, el calculado por RELAP5 tiene una pendiente mayor que el de TRACE5. Esto se lo atribuye a que las correlaciones utilizadas por ambos códigos son distintas.
- Se observó que el cálculo del DNBR utilizando RELAP5 y TRACE5 fueron similares en la zona cercana a la salida del canal. Por otro lado, a medida que se acerca a la entrada, la diferencia entre ambos cálculos aumenta. Esto se lo atribuyó a que las propiedades

utilizadas del fluido son distintas. En el caso de RELAP5 se usaron los datos que tiene cargados mientras que para TRACE5, al no disponer de una señal variable que pueda calcular las entalpías de saturación, se tuvo que usar las correlaciones presentadas en la sección 5.

- Se analizaron los tiempos de cómputo de los cálculos en RELAP5 y TRACE5. Se comprobó que el tiempo de cómputo de TRACE5 resultó mucho menor. Esto se debe a que en este cálculo se utilizó el esquema SETS, el cual viola el límite de Courant, lo cual permitió usar un paso de tiempo de 10 segundos. Por su parte, en RELAP5 este criterio restringió el paso de tiempo a 0,02 segundos.

## 8. REFERENCIAS

Nuclear Systems Analysis Operations, Information Systems Laboratories, RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods, October 2013 Division of System Analysis. U.S. NRC, *TRACE V5.840 Theory Manual*. 2013.

Noori, R.M., Saeed, A.F., A study of finding empirical correlation for the Nusselt number and the factors influencing it for perforated fin array of different shapes, Enero 2013, Ain Shams Engineering Journal.

Holland, F.A., Bragg, R., Fluid Flow for Chemical Engineers, 1995, Segunda edición.

Leiner, W., Heat transfer by nucleate pool boiling—general correlation based on thermodynamic similarity, Marzo 1994, International Journal of Heat and Mass Transfer

Mahaffy, J.M., A test for stability of linear differential delay equations, 1982

Micaelli, J. C., Document de Synthèse CATHARE (CATHARE An Advanced Best-Estimated Code for PWR Safety Analysis), 1987.

Ransom, V. H., Numerical Modeling of Two-Phase Flows for Presentation at Ecole d'Ete d'Analyse Numerique, 1989.

Palao, C.M., Cuervo Gomez, D., Análisis de Sensibilidad del flujo crítico de calor en un elemento PWR, Junio 2018.

NIST (National Institute of Standards and Technology) webbook, <https://webbook.nist.gov/chemistry/>, 2024.