

## **SIMULACIÓN DE EXPERIMENTOS DE ESTABILIDAD EN FLUJO DE DOS FASES ACOPLANDO RELAP A UN CÓDIGO EXTERNO DE CONTROL INTELIGENTE BASADO EN LÓGICA DIFUSA**

**Germán Theler**

*TECNA Estudios y Proyectos de Ingeniería S.A.  
Encarnación Ezcurra 365, C1107CLA Buenos Aires, Argentina  
gtheler@tecna.com, <http://www.tecna.com>*

**Palabras Clave:** Estabilidad, Flujo de Dos Fases, Lógica Difusa, RELAP

**Resumen.** En este trabajo mostramos cómo una extensión del código termohidráulico RELAP desarrollada por TECNA S.A. para Nucleoeléctrica Argentina S.A. puede ser utilizada para acoplar un código externo que sea capaz de controlar dinámicamente la simulación de un experimento para estudiar estabilidad en flujo de dos fases. En particular, modelamos un experimento de laboratorio con RELAP aprovechando el hecho de que los modelos de flujo de dos fases de este código arrojan resultados numéricos que concuerdan muy bien con situaciones experimentales. Por otro lado, desarrollamos un sistema experto de control lingüístico basado en lógica difusa que implementa acciones similares a las que realizaría un investigador humano trabajando en el laboratorio. Utilizando el mecanismo de intercambio de información propuesto por la extensión RELAP-CPL desarrollada por TECNA, mostramos cómo es posible acoplar estas dos herramientas para simular un experimento de estabilidad en flujo de dos fases. El código fuzzy externo regula las condiciones del experimento, interpreta en forma on-line los resultados del loop numérico y construye un mapa de estabilidad en el plano  $N_{\text{sub}}$  vs.  $N_{\text{pch}}$ , tal como lo haría un investigador humano realizando un experimento de flujo de dos fases real.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de inestabilidades termofluidodinámicas es un tema de gran importancia en el diseño termohidráulico de reactores nucleares de potencia. En particular, el problema de flujo de dos fases presenta ciertas complejidades que hacen que su descripción matemática se deba basar fuertemente en correlaciones empíricas y modelos especiales (Lahey, 1977). Existen varios códigos computacionales comerciales que resuelven las ecuaciones de conservación dependientes del tiempo y que han sido validados contra una gran cantidad de experimentos en diversas condiciones, por lo que se acepta en general que los resultados obtenidos con estas simulaciones numéricas reproducen correctamente los sistemas reales modelados. Sin embargo, estos códigos computacionales normalmente están diseñados para simular casos o bien autónomos o que no requieren de la intervención de un experto humano para evaluar su evolución temporal y son poco flexibles a la hora de cambiar en forma dinámica las condiciones de la simulación.

En particular, el código RELAP inicialmente desarrollado por la Nuclear Regulatory Commission de los Estados Unidos de América para simular transitorios de pérdida de refrigerante en reactores nucleares de agua presurizada incluye una gran cantidad de correlaciones (Information Systems Laboratories Inc., 2006a) que abarcan la mayoría de las condiciones operacionales del flujo de dos fases. Tanto las correlaciones como los métodos numéricos han sido validado frente a una gran cantidad de casos experimentales (Shieh et al., 2006; Information Systems Laboratories Inc., 2006b). No sólo RELAP sirve para la evaluación de transitorios de plantas en centrales nucleares, sino que también es normalmente utilizado para contrastar y validar resultados obtenidos con otros códigos de cálculo termohidráulicos (Zanocco et al., 2004).

Si bien RELAP arroja resultados satisfactorios en la mayoría de los casos, existen situaciones en las cuales el programa no presenta suficiente flexibilidad como para realizar ciertos cálculos. Por ejemplo, si bien es un código diseñado para simular el comportamiento de reactores nucleares de potencia, los modelos neutrónicos que contiene son bastante simplificados y resultan limitados en algunas ocasiones. De la misma manera, aunque RELAP dispone de algunos mecanismos para simular sistemas de control y protección, éstos resultan o bien escasos o bien demasiado simples para poder simular una lógica de control compleja como la encontrada en las centrales nucleares. En este sentido, TECNA S.A. ha modificado el código RELAP agregándole la posibilidad de intercambiar información con códigos externos a través de recursos de memoria compartida. La herramienta resultante, llamada RELAP-CPL es utilizada por Nucleoeléctrica Argentina S.A. para realizar simulaciones acopladas entre códigos de planta, códigos neutrónicos cinético-espaciales y simulaciones de la lógica de control de la Central Nuclear Atucha II.

El objetivo de este trabajo es mostrar cómo es posible utilizar la extensión RELAP-CPL para estudiar inestabilidades fluidodinámicas simulando un experimento de laboratorio. Para ello, utilizamos el código RELAP acoplado a un código de control inteligente basado en lógica difusa, el cual controla las condiciones del experimento y es capaz de inferir para qué combinación de parámetros el flujo resultante es estable o inestable.

## 2. INESTABILIDADES EN FLUJO DE DOS FASES

El flujo de un fluido sujeto a condiciones de transferencia de calor tales que éste tenga la posibilidad de cambiar de fase —líquida a gaseosa o viceversa— es susceptible de presentar inestabilidades. Las ecuaciones de flujo de dos fases presentan características de no-linealidad mucho más acentuadas que en el caso de flujo de una fase. Estas complejidades están caracterizadas físicamente por grandes cambios en la geometría de las dos fases, haciendo difícil

encontrar modelos matemáticos capaces de reproducir los resultados empíricos y que a la vez sean tratables numéricamente a un costo computacional razonable (Zanotti et al., 2007). Todas las ecuaciones que representan la física del problema del flujo de dos fases son esencialmente no lineales, lo que hace por un lado que los sistemas resultantes sean más propensos a inestabilidades y, a la vez, estas inestabilidades sean más complejas y difíciles de estudiar que en el caso de simple fase (Theiler, 2008). El problema de la estabilidad de sistemas que trabajan con flujo de dos fases en ebullición es un tema abierto y de gran interés tanto en la comunidad científica (Marcel et al., 2002) como en la industria (Kakac y Bon, 2008) y especialmente en aspectos de diseño de reactores nucleares de potencia (Van Bragt y Van der Hagen, 1998).

## 2.1. EL PROBLEMA A ESTUDIAR

Los experimentos sobre estabilidad de flujo de dos fases se realizan sobre loops cerrados que representan un sistema físico de interés industrial, por ejemplo subcanales de reactores nucleares de potencia o modelos a escala con una geometría simplificada de sistemas más complejos (Mochizuki, 1992). Sin embargo, en este trabajo estamos más interesados en proponer una metodología de análisis que en los resultados en sí, por lo que simulamos un experimento más sencillo que ha sido estudiado ampliamente en la literatura, tanto en forma teórica como experimental (Achard et al., 1985; Clausee y Lahey, 1991; Delmastro et al., 2001; Garea, 1998). El problema consiste en un canal vertical de sección transversal constante calentando uniformemente en toda su longitud. El tramo está sujeto a una diferencia de presión constante y por el extremo inferior entra fluido subenfriado con una entalpía  $h_i$  fija (figura 1). Existen pérdidas de carga concentradas tanto a la entrada como a la salida y el canal presenta fricción distribuida en toda su longitud.

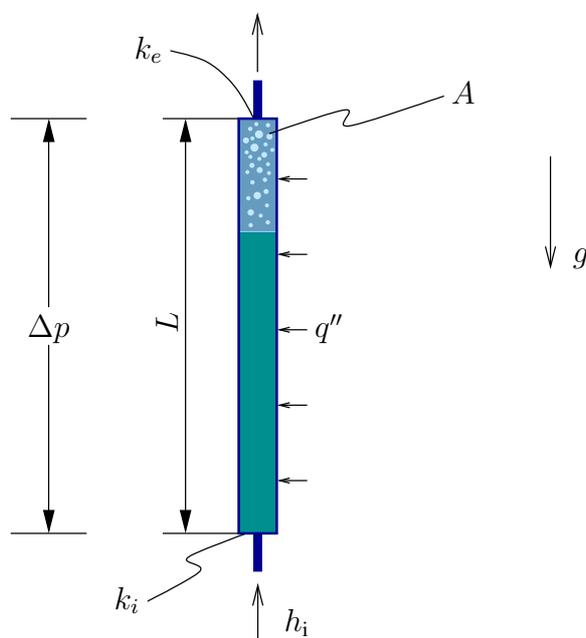


Figura 1: El problema a estudiar es un canal vertical en ebullición

Si las condiciones de calentamiento y de flujo son adecuadas, el fluido entra en ebullición en algún lugar del canal y por el extremo superior sale un flujo de dos fases. Suponiendo que la presión absoluta a la que está sujeto el fluido es homogénea en todo el tramo, entonces los

números adimensionales de subenfriamiento y de cambio de fase

$$N_{\text{sub}} = \frac{h_f - h_i}{h_{fg}} \cdot \frac{v_{fg}}{v_f} \quad (1)$$

$$N_{\text{pch}} = \frac{q}{\dot{m}_0} \frac{v_{fg}}{h_{fg} v_f} \quad (2)$$

están bien definidos. El número de subenfriamiento es proporcional a la diferencia entre la entalpía de saturación y la temperatura de entrada, mientras que el número de cambio de fase es proporcional a la potencia total  $q$  transferida a través de la pared del canal e inversamente proporcional al caudal de estado estacionario  $\dot{m}_0$ . Cuando  $N_{\text{pch}} > N_{\text{sub}}$ , ocurre ebullición en el seno del fluido y hay flujo de dos fases a la salida del canal.

El objetivo del experimento es estudiar la estabilidad del flujo de dos fases en el problema del canal vertical. Por estabilidad nos referimos a la idea de Lyapunov, es decir, que ante pequeñas perturbaciones, el flujo en el espacio de las fases vuelva al punto fijo solución del sistema. El resultado que buscamos es conocer cómo depende la estabilidad de los parámetros del problema, que en principio son muchos. Sin embargo, éstos pueden ser reducidos mediante una adimensionalización conveniente (Theler, 2008, Apéndice A). Más aún, en la literatura (Rizwan-Uddin y Dorning, 1986; Lahey, 1992) se muestra que los parámetros más importantes que dominan la estabilidad del flujo de dos fases son el número de cambio de fase y el número de subenfriamiento definidos en las ecuaciones (1) y (2).

### 3. CÓDIGOS DE CÁLCULO NUMÉRICO

Dado que la evaluación de estados de planta luego de incidentes y accidentes postulados es clave en el estudio de seguridad de las centrales nucleares, históricamente ha habido muchos códigos de cálculo capaces de simular problemas termofluidodinámicos transitorios. Uno de los códigos más utilizados es RELAP (Information Systems Laboratories Inc., 2003), que es el código base que utilizamos en este trabajo para realizar las simulaciones de transferencia de calor en flujo de dos fases. Por otro lado, además de simular la física del experimento con un código termohidráulico, simulamos el comportamiento de un operador humano controlando las condiciones del experimento y obteniendo los resultados del mismo. Para ello, utilizamos el código meloncito que es una versión reducida del código de control basado en lógica difusa MELON desarrollado en el Laboratorio de Cavitación y Biotecnología del Instituto Balseiro como parte de trabajos de tesis de grado y de posgrado (Theler, 2007, 2008). Ambos códigos intercambian información a través de segmentos de memoria compartida (Mitchell et al., 2001). El código de control soporta en forma nativa objetos de memoria compartida, mientras que para acoplar RELAP con meloncito hemos utilizado las extensiones RELAP-CPL desarrolladas por TECNA S.A. para Nucleoeléctrica Argentina S.A. como parte de trabajos realizados para el licenciamiento de la Central Nuclear Atucha II.

#### 3.1. RELAP

RELAP es un código de cálculo termohidráulico de tipo best-estimate para la simulación de transitorios durante accidentes postulados en reactores nucleares de potencia. Originalmente fue desarrollado por el Idaho National Engineering Laboratory para la Nuclear Regulatory Commission de los Estados Unidos. Actualmente el código es propiedad de Information Systems Laboratories Inc. pero es posible contribuir con nuevos modelos, rutinas y validaciones a

través de diversos programas de actualización a nivel mundial, a los que Nucleoeléctrica Argentina S.A. está suscripta.

La versión actual de RELAP —la número cinco— resuelve las ecuaciones unidimensionales de flujo de dos fases utilizando el modelo de dos fluidos fuera de equilibrio termodinámico, teniendo en cuenta todos los posibles mecanismos de transferencia de calor entre el fluido y estructuras externas. Existen modelos especiales para tener en cuenta elementos particulares tales como bombas, presurizadores, turbinas, acumuladores, etc. Siendo un código dirigido a la simulación de centrales nucleares, es posible tener en cuenta fuentes de calor de fisión y sistemas de control. Sin embargo, estos modelos pueden llegar a resultar bastante limitados —la neutróica está basada en la aproximación de cinética puntual y funciones de control son muy básicas y escasas— para realizar cierta clase de simulaciones que necesitan un cierto nivel de detalle.

De todas maneras, las correlaciones de transferencia de calor que provee el código han sido validadas experimentalmente y, en general, RELAP5 ha llegado a una etapa de maduración en la que la evaluación de las condiciones de flujo de dos fases reproduce la realidad en forma muy fiel. Es por eso que en este trabajo simulamos un problema sencillo de estabilidad en flujo de dos fases donde RELAP arroja resultados numéricos que esperamos sean representativos de un experimento real.

### 3.2. RELAP-CPL

Si bien RELAP5 comenzó a desarrollarse a principios de 1980, las primeras versiones de RELAP fueron escritas a fines de 1960. El código actual está escrito en Fortran 77 y su base de diseño es prácticamente la original. Las definiciones de entrada están pensadas para ser introducidas como tarjetas perforadas (hoy en día como números en un archivo de texto ASCII), y las salidas consisten en texto listo para ser impreso en páginas de 72 líneas y en datos binarios para ser grabados en cintas magnéticas. El código está diseñado para funcionar en procesadores tanto little endian como big endian y en una gran diversidad de sistemas operativos y compiladores, la mayoría de los cuales resultan hoy obsoletos ([Information Systems Laboratories Inc., 2006c](#)).

Debido a que los modelos de cinética neutróica y de sistemas de control son algo limitados en el código base, Nucleoeléctrica Argentina S.A. ha encarado la tarea de realizar diferentes modificaciones para lograr acoplar RELAP con otros códigos de cálculo. En particular, TECNA S.A. ha desarrollado unas extensiones denominadas RELAP-CPL ([TECNA S.A., 2009](#)) mediante las cuales es posible intercambiar información arbitraria con otros procesos corriendo en la misma computadora a través de segmentos de memoria compartida, sincronizando los pasos de integración mediante semáforos ([Wall et al., 1999](#)).

RELAP-CPL lee, además del archivo de input estándar de RELAP, un archivo que contiene keywords mnemónicas que indican —entre otras cosas— qué variables deben ser exportadas y qué variables deben ser importadas desde códigos externos a través de segmentos de memoria compartida. El código permite una gran flexibilidad en la manera de realizar el intercambio de información y la sincronización, e incluso permite que se controlen ciertos aspectos del funcionamiento del integrador de RELAP tales como el momento de escritura de registros de restart o la finalización de la simulación externamente. Es posible realizar acoples múltiples con más de un código externo e incluso acoplar dos o más instancias de RELAP-CPL entre sí.

En este trabajo, el archivo de input contiene un modelo de RELAP del problema descrito en la sección 2.1, y el archivo de acople hace que al código de control le lleguen ciertas variables —que podrían ser indicaciones de instrumentos en el experimento real— y RELAP acepte que

el controlador le indique cuánta potencia debe disiparse en la pared del canal.

### 3.3. meloncito

El código meloncito es un software de control que actualmente (2009) está en desarrollo en el marco de un trabajo de doctorado en Ingeniería Nuclear en el Instituto Balseiro. Es una reescritura del código MELON desarrollado como parte de trabajos de ingeniería y maestría (Theler, 2007, 2008), apuntando principalmente a implementar un controlador basado en lógica difusa (Zadeh, 1965) capaz de actuar tanto sobre simulaciones numéricas —locales o remotas a través de TCP— como sobre plantas reales utilizando la biblioteca COMEDI. En este sentido, meloncito sólo implementa comunicación a través de memoria compartida pero extiende las capacidades de evaluación de funciones algebraicas, diferenciales y trascendentales de MELON. En cualquier caso, el código está en desarrollo y las características de ambos programas cambiarán con el tiempo.

## 4. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para resolver un transitorio termofluidodinámico con RELAP es necesario ingresar tarjetas numéricas en un archivo de texto definiendo la geometría, propiedades físicas y condiciones iniciales del problema. Por otro lado, debemos diseñar una lógica de control que simule el comportamiento de un experto humano realizando el experimento físico a estudiar. En este caso elegimos una combinación de reglas **IF - THEN** tanto booleanas como difusas para controlar la potencia disipada en el canal y saber si el flujo resultante en cada caso es estable o no.

### 4.1. Nodalización de RELAP

El input de RELAP utilizado define dos time-depedant volumes que funcionarán como condiciones de contorno de presión del canal (figura 2). Más aún, el volumen inferior fijará la entalpía de entrada del fluido. Estos dos volúmenes se conectan a través de single-junctions al pipe que representa el canal vertical. Una heat structure disipa una potencia total  $q$  uniformemente en la superficie del canal.

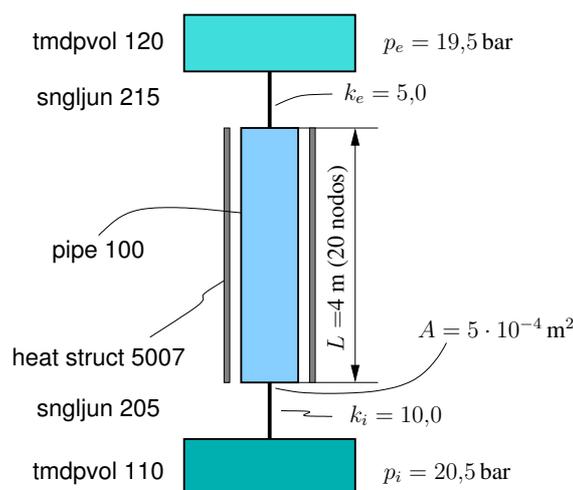


Figura 2: Nodalización de RELAP del canal en ebullición vertical a estudiar

El canal tiene una longitud  $L = 4$  m, presenta un área transversal  $A = 0,0005$  m<sup>2</sup> y está suje-

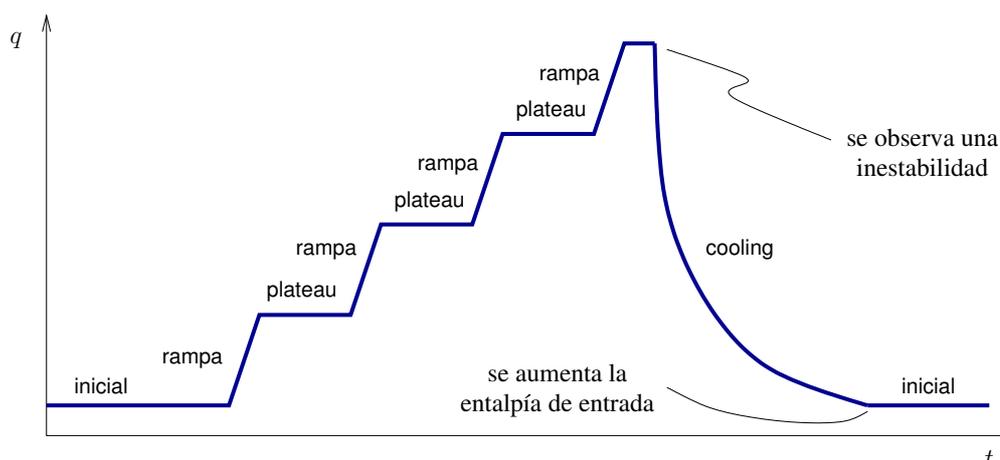


Figura 3: Esquema de evolución temporal propuesta para la potencia disipada

to a una diferencia de presión fija  $\Delta p = p_i - p_e = 1$  bar. A la entrada se presenta un coeficiente de pérdida de carga concentrada  $k_i = 10$  y a la salida  $k_e = 5$ . La temperatura de entrada del fluido y la potencia instantánea  $q$  son provistas por meloncito en cada paso de tiempo.

#### 4.2. Lógica de control

Además de simular la física del experimento, debemos simular el comportamiento del operador. Para construir un mapa de estabilidad en el plano  $N_{\text{sub}}$  vs.  $N_{\text{pch}}$  debemos poner el canal a funcionar con diferentes combinaciones de potencias —proporcionales al número de cambio de fase— y de entalpías de entrada, es decir, de números de subenfriamiento.

La estrategia propuesta consiste en, dejando fija la temperatura de entrada, ir aumentando la potencia en sucesivos pasos esperando hasta que el sistema llegue a un estado estacionario en cada uno. Si luego de un cierto tiempo efectivamente las condiciones del experimento se estabilizan, el investigador anota en un papel que dicha combinación de potencia y temperatura de entrada es estable y aumenta nuevamente la potencia. Si en algún momento las condiciones del flujo se hacen inestables, baja rápidamente la potencia y anota en el mismo papel —o en otro— que en esas condiciones el canal es inestable. La potencia debería evolucionar en función del tiempo, para una temperatura de entrada constante, aproximadamente de la forma ilustrada en la figura 3.

Si  $t_{\text{rel}}$  es el tiempo transcurrido desde el último cambio de estado, entonces con reglas booleanas **IF** - **THEN** del orden de

```

IF estado_anterior = inicial AND t_rel > ancho_inicial THEN {
    estado = rampa
    siguiente_potencia += incremento_potencia
}
IF estado_anterior = rampa AND potencia > siguiente_potencia THEN {
    estado = plateau
}

```

es posible implementar fácilmente la dependencia temporal de la potencia propuesta en la figu-

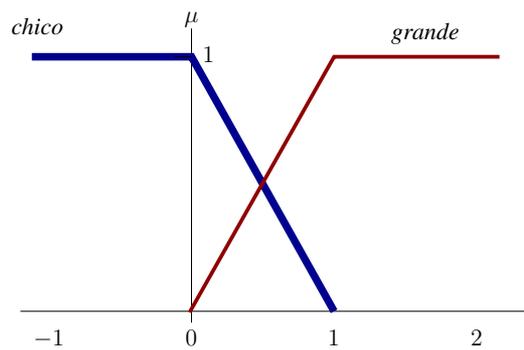


Figura 4: Conjuntos difusos normalizados *chico* y *grande*. Para cada variable lingüística sobre los que aplican, cambia la escala del eje de las abscisas que representa al universos de discurso.

ra 3. Ahora bien, un operador humano observando en tiempo real las variables del experimento —digamos la lectura de un caudalímetro— puede saber cuándo el flujo en el canal es estable o cuándo se dan condiciones de inestabilidad fluidodinámica. Ni bien el caudal comience a oscilar o acuse una lectura muy diferente a la correspondiente al paso de potencia anterior, el investigador bajará la potencia para volver a flujo de una fase y comenzar nuevamente la escalada de potencia, para una nueva temperatura de entrada. Computacionalmente es posible implementar una toma de decisiones de esta clase de diferentes maneras. En este trabajo proponemos utilizar lógica difusa para evaluar si la solución de RELAP del problema es estable o no.

Por un lado, definimos una variable *oscilaciones* que calculamos como

$$oscilaciones = \int \left| \frac{d}{dt} (caudal) \right| dt$$

donde *caudal* es el caudal másico instantáneo calculado por RELAP, y su valor se reinicializa a cero cada vez que comienza un nuevo plateau. Por otro lado, calculamos el valor absoluto de la diferencia entre el caudal instantáneo y el caudal que había al finalizar el último plateau

$$abs\_dif\_caudal = |caudal - ultimo\_caudal|$$

Las reglas difusas para evaluar la estabilidad de la solución que usamos son

**IF estado IS cooling THEN condicion IS estable**

**IF estado IS inicial THEN condicion IS estable**

**IF estado IS rampa THEN condicion IS estable**

**IF estado IS plateau AND abs\_dif\_caudal IS chico THEN condicion IS estable**

**IF estado IS plateau AND abs\_dif\_caudal IS grande THEN condicion IS inestable**

**IF estado IS plateau AND t\_rel IS grande AND oscilaciones IS grande THEN condicion IS inestable**

**IF estado IS plateau AND t\_rel IS chico AND oscilaciones IS chico THEN condicion IS estable**

donde los conjuntos difusos *grande* y *chico* tienen la forma mostrada en la figura 4. Para cada variable lingüística sobre los que aplican —*abs\_dif\_caudal*, *t\_rel* y *oscilaciones*— la escala del eje de las abscisas es diferente. Análogamente, los conjuntos difusos *estable* e *inestable* correspondiente al universo de discurso de la variable lingüística *condicion* son similares a los mostrados

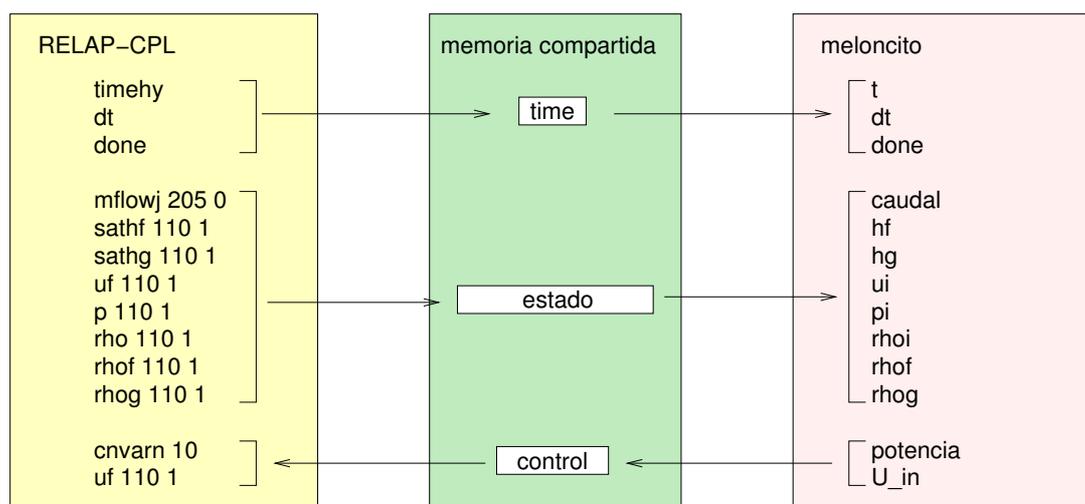


Figura 5: Esquema de acople entre RELAP-CPL y meloncito. Las variables sobre el tiempo y el paso de tiempo son usadas por el controlador para evaluar en qué estado de la figura 3 se encuentra, y para computar derivadas e integrales. El caudal másico es el principal observable con el cual el controlador toma decisiones y escribe la potencia total a disipar en una variable de control de RELAP. El resto de las variables son utilizadas para calcular  $N_{\text{sub}}$  y  $N_{\text{pch}}$ .

en la figura 4, sólo que las funciones de membresía asociadas son triangulares centradas en cero y uno respectivamente. Esto es así ya que las funciones de membresía de conjuntos difusos que aplican a variables de salida de un controlador deben ser integrables en el universo de discurso para poder aplicar alguno de los métodos de defuzzification disponibles (Lee, 1990).

Una vez evaluadas las reglas lingüísticas, una regla booleana decide si es necesario pasar al estado cooling, y anotar que el punto es inestable

```

IF condicion > threshold THEN {
    estado = cooling
}

```

donde el valor del umbral puede variar dependiendo de la sensibilidad del operador humano. En este caso tomamos  $threshold = 0,75$ . Luego de bajar la potencia hasta el valor inicial, aumentamos la entalpía de entrada del fluido, ponemos *estado* en *inicial* y volvemos a comenzar la subida de potencia.

### 4.3. Acople

Para que RELAP simule el comportamiento físico del canal vertical de la figura 1 sujeto a las condiciones controladas por la inferencia difusa del código meloncito, es necesario que ambos programas compartan cierta información. RELAP resuelve las ecuaciones de conservación utilizando el modelo de dos fluidos con un método numérico dado, cuyo paso de tiempo se ajusta dinámicamente, bien para acercarse al límite de estabilidad de Courant o bien para mantener acotado el error cometido por la discretización de la conservación de masa. En cualquier caso, en cada paso de tiempo RELAP-CPL escribe el tiempo actual, el paso de tiempo de integración —datos necesarios para evaluar derivadas e integrales numéricamente— y un flag para indicar si finalizó la simulación en un segmento de memoria compartida con identificador

“time”. Además escribe el caudal másico del canal (flujo en la junction 205) y propiedades termodinámicas del volumen inferior (nodo número 1 del componente 110) con los cuales es posible estimar los números adimensionales de subenfriamiento y de cambio de fase definidos en las ecuaciones (1) y (2) en el segmento “estado”. Una vez que esta información fue escrita, pone en verde un semáforo que indica al código meloncito que puede proceder a leer estos datos. Luego el software de control evalúa la lógica, toma las decisiones necesarias y escribe en “control” la energía interna de entrada al canal  $U_i$  y la potencia total a disipar en la pared  $q$  (variable de control número 10), poniendo en verde otro semáforo que le indica a RELAP que continúe con la integración (figura 5).

En este caso, para modificar las condiciones de entrada es necesario importar desde RELAP-CPL la energía interna específica y no otra variable (tal como la temperatura o la entalpía) ya que las ecuaciones de conservación están escritas en función de la energía interna ([Information Systems Laboratories Inc., 2003](#), Capítulo 3) y el resto de las variables termodinámicas se actualizan en función de estas. Por otro lado, la potencia disipada en la heat structure que representa el calefactor es tomada de una variable de control, a la cual RELAP-CPL le asigna el valor de la variable *potencia* de meloncito.

## 5. RESULTADOS

Para potencias bajas ( $N_{pch} < N_{sub}$ ), el fluido se mantiene subenfriado en toda la longitud del canal y el caudal de circulación no depende fuertemente de la potencia. Cuando comienza a generarse vapor dentro del canal —incluso mediante ebullición subenfriada, efecto que es tenido en cuenta por las ecuaciones constitutivas de RELAP— entonces la pérdida de carga aumenta sensiblemente y el caudal disminuye. Si las condiciones son tales que el flujo es estable, entonces éste alcanza a un valor fijo para cada plateau de potencia, como observamos en la figura 6.

Por otro lado, en la figura 7 vemos qué es lo que sucede en un entorno del límite de estabilidad. Para una dada potencia ocurre una bifurcación de Hopf ([Rizwan-Uddin y Dorning, 1986](#); [Garea, 1998](#)) y aparece un ciclo límite. Este ciclo límite es estable en una zona finita del espacio de parámetros ([Theler, 2008](#)) y se observan oscilaciones autosostenidas en un entorno abierto del número de cambio de fase tanto numérica como experimentalmente ([Delmastro, 1993](#); [Delmastro y Clause, 1994](#)). Hemos construido la figura 7 anulando las reglas lingüísticas difusas que detectan la aparición de las inestabilidades. Regulando la escala de las abscisas de la función de membresía *grande* (figura 4) asociados a la variable lingüística *oscilaciones*, es posible hacer que el controlador detecte como inestabilidad la aparición del ciclo límite o recién que clasifique como inestable al comportamiento que se observa luego de los diez mil segundos en la figura 7.

Barriando el espacio de parámetros  $q$  vs.  $U_i$  con el controlador escribiendo para qué potencias y temperaturas de entrada el canal llega a un estado estable, obtenemos el mapa de estabilidad mostrado en la figura 8. Allí vemos que si bien el límite de estabilidad no es monótono con la potencia —es decir, tiene la forma de “nariz”— éste no es suave sino que tiene pequeñas discontinuidades en la frontera. Esto se debe a que localmente, RELAP evalúa el régimen de flujo de dos fases nodo por nodo dependiendo de ciertas correlaciones en función de algunos números adimensionales ([Information Systems Laboratories Inc., 2006a](#)). Dependiendo del régimen de flujo de cada nodo —bubbly, mist, slug, etc.— RELAP elige una u otra correlación para evaluar la transferencia de calor y momento tanto el fluido y la pared del canal como la transferencia de calor y momento entre fases. Esto hace que dependiendo de las condiciones locales —y en particular de la nodalización elegida— el carácter estable del flujo no sea continuo en los parámetros

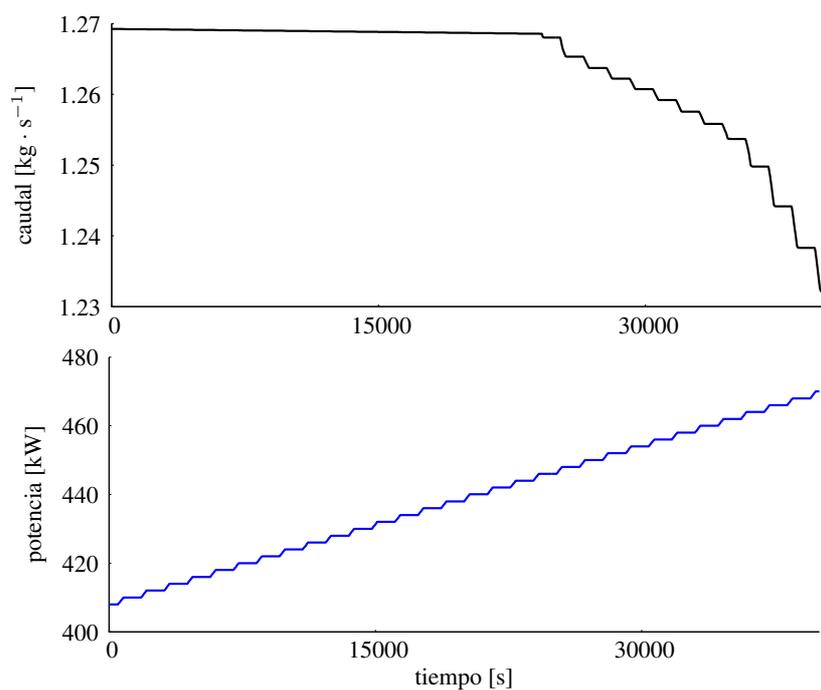


Figura 6: Caudal másico y potencia entregada en función del tiempo. En todos los casos, el caudal alcanza un valor fijo para cada plateau por lo que el sistema es estable para todas las potencias. Durante los primeros veinte mil segundos el fluido se mantiene subenfriado en todo el canal y la pérdida de carga es esencialmente independiente de la potencia.

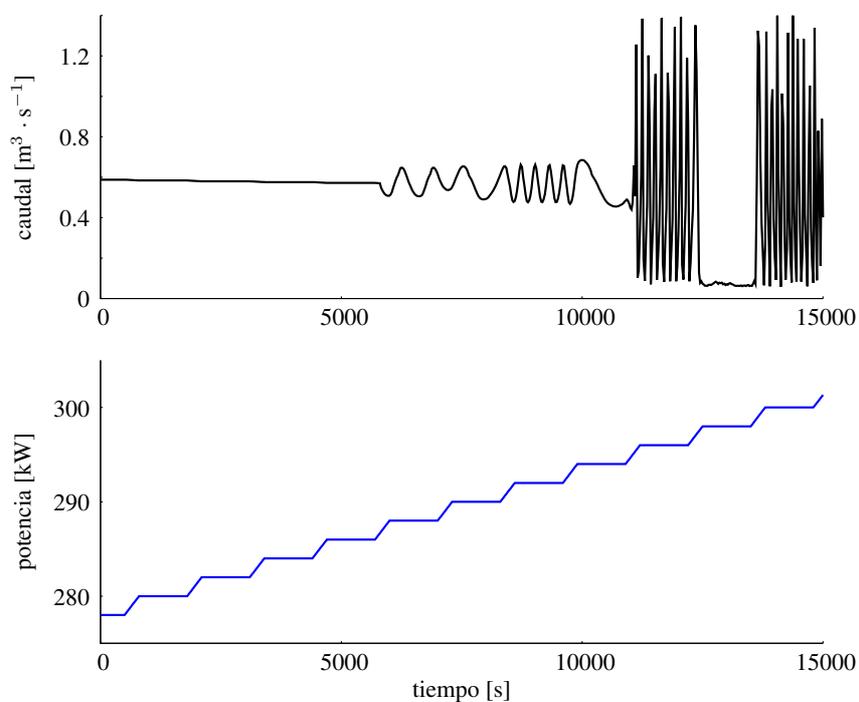


Figura 7: Cuando la potencia aumenta, el canal se pone inestable. Primero aparecen ciclos límites y luego el caudal oscila en forma completamente inestable.

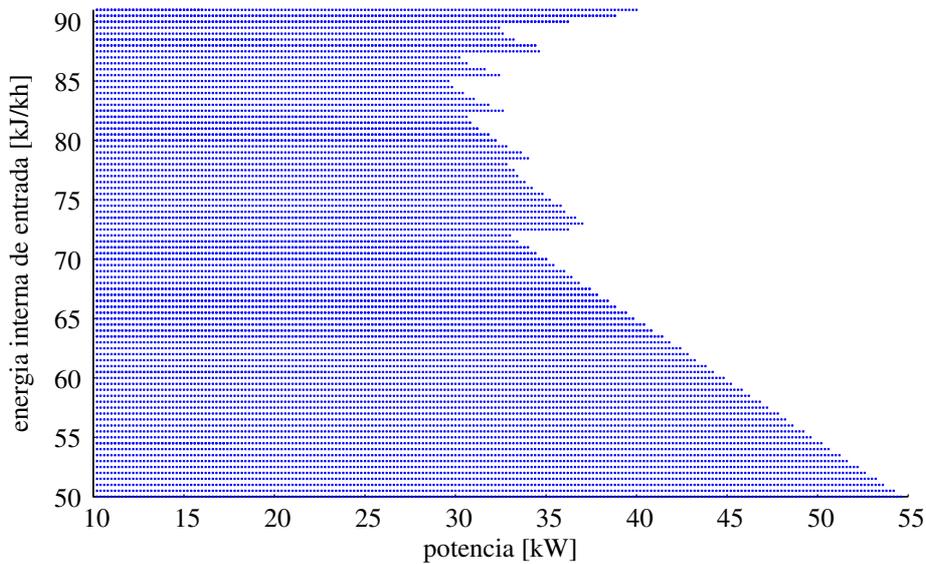


Figura 8: Mapa de estabilidad en el plano  $q$  vs.  $U_i$ . Los puntos mostrados son combinaciones de parámetros que logran un flujo estable. Las discontinuidades en la frontera de estabilidad se deben a que cambian en forma abrupta las correlaciones de transferencia de momento y calor al cambiar localmente el régimen de flujo —bubbly, mist, slug, etc.— en nodos individuales de la discretización utilizada por RELAP.

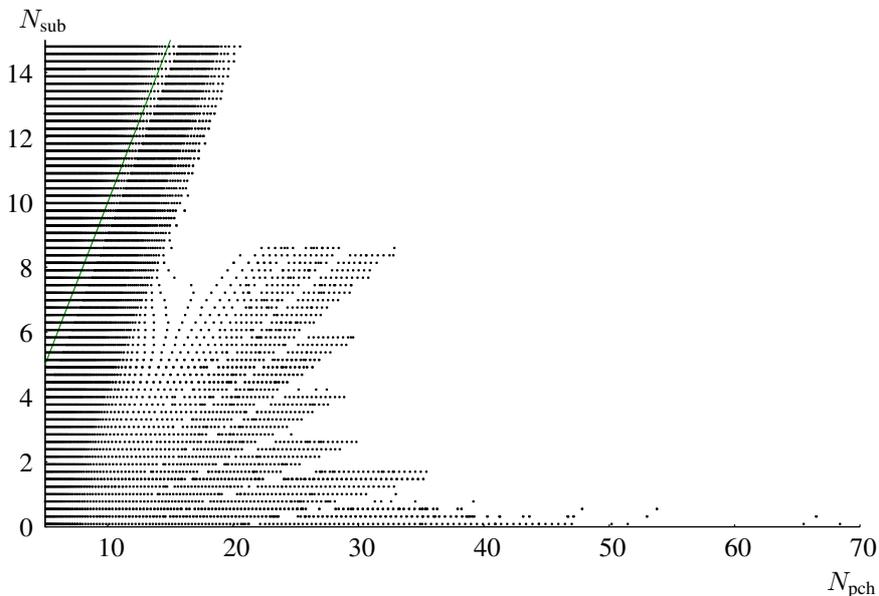


Figura 9: Mapa de estabilidad en el plano  $N_{sub}$  vs.  $N_{pch}$ . Las discontinuidades en la frontera de estabilidad son aún más evidentes que en la figura 8. Los números adimensionales son estimados y no están bien definidos cuando las propiedades termohidráulicas dependen de la posición axial dentro del canal.

externos. Esta es una característica inherente a la forma de resolver las ecuaciones de flujo de dos fases de RELAP. Si bien no representa exactamente la física del canal en ebullición en el sentido de que un experimento real no presentaría estas pequeñas “narices de discontinuidad”, el comportamiento general al alejarnos de la frontera de inestabilidad es correcto.

En los estudios teóricos de las inestabilidades en un canal en ebullición vertical, se suele analizar el problema en función de números adimensionales. Para ello, es útil introducir los números  $N_{\text{sub}}$  y  $N_{\text{pch}}$  en las ecuaciones (1) y (2) que están bien definidos cuando las propiedades termodinámicas — $h_{fg}$ ,  $v_f$ , etc.— se suponen homogéneas en toda la longitud del canal. En este caso, dado que la presión no es constante, estas propiedades cambian con la posición. De cualquier manera, es posible estimar estos dos números adimensionales tomando las propiedades de algún punto del canal. En particular, tomando las propiedades del volumen inferior obtenemos el mapa de la figura 9. Nuevamente, los puntos mostrados son casos estables. En esta figura las discontinuidades en la frontera de evaluación son más evidentes aún que en la figura 8 ya que a la dependencia de los resultados con el régimen de flujo se agregan las incertezas en la evaluación de los números adimensionales. Es posible mejorar la construcción de esta figura por un lado evaluando de alguna forma alternativa los números de subenfriamiento y de cambio de fase y por otro agregando una lógica extra al controlador donde se refinan los incrementos de potencia en la cercanía de la frontera de inestabilidad.

## 6. CONCLUSIONES

Hemos logrado acoplar la extensión desarrollada por TECNA S.A. del código de cálculo RELAP a un software de control inteligente basado en lógica difusa para estudiar inestabilidades en un flujo de dos fases. Simulamos por un lado la física del fenómeno termofluidodinámico mediante el modelo de dos fluidos para las ecuaciones de conservación y relaciones empíricas para las ecuaciones constitutivas con el código RELAP, y por el otro la lógica que un investigador humano podría seguir para realizar un experimento real en un laboratorio. El código de control ha sido capaz de reconocer la aparición de inestabilidades y construir mapas de estabilidad en función de parámetros de interés.

Observamos que existe una serie de discontinuidades de la frontera de estabilidad en función de la potencia y de la temperatura de entrada. Este efecto se debe por un lado a la discretización espacial de la longitud del canal vertical estudiado y por otro a que el código utiliza localmente diferentes correlaciones de transferencia de calor dependiendo del régimen de flujo estimado en cada nodo. Esto hace que existan grandes cambios en los patrones de flujo frente a pequeñas modificaciones de los parámetros externos, acarreado discontinuidades en la frontera de estabilidad. La dependencia de los resultados de este tipo de estudios numéricos de inestabilidades termofluidodinámicas puede entenderse mejor modelando experimentos reales, comparando resultados y ajustando parámetros para obtener resultados similares.

De cualquier manera, el objetivo de este trabajo era mostrar que es posible aumentar enormemente las capacidades de cálculo del código RELAP a través de la extensión RELAP-CPL y el acople con otros códigos genéricos. Los resultados obtenidos son una muestra de que ello es posible, y queda abierta una línea de trabajo para futuras investigaciones en el campo de la transferencia de calor y la mecánica de fluidos.

## REFERENCIAS

Achard J., Drew D., y Lahey R.T. The analysis of nonlinear density-wave oscillations in boiling channels. *Journal of Fluid Mechanics*, (155), 1985.

- Clausse A. y Lahey R.T. The analysis of periodic and strange attractors during density-wave oscillations in boiling flows. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2(1), 1991.
- Delmastro D. *Aplicación de la teoría de sistemas dinámicos al análisis de inestabilidades termohidráulicas*. Tesis de Doctorado en Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, 1993.
- Delmastro D. y Clausse A. Experimental phase trajectories in boiling flow oscillations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, (9), 1994.
- Delmastro D., Juanicó L., y Clausse A. A delay theory for boiling flow stability analysis. *International Journal of Multiphase Flow*, (27), 2001.
- Garea V. *Nodal analysis of two-phase flow instabilities*. Tesis de Doctorado, Rensselaer Polytechnic Institute, 1998.
- Information Systems Laboratories Inc. RELAP5/MOD3.3 code manual volume 1: Code structure, system models and solution methods. Informe Técnico NUREG/CR-5535/Rev 3 Vol I, 2003.
- Information Systems Laboratories Inc. RELAP5/MOD3.3 code manual volume 4: Models and correlations. Informe Técnico NUREG/CR-5535/Rev 3 Vol IV, 2006a.
- Information Systems Laboratories Inc. RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume 7: Summaries and reviews of independent code assessment reports. Informe Técnico NUREG/CR-5535/Rev 3 Vol VII, 2006b.
- Information Systems Laboratories Inc. RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume 8: Programmers manual. Informe Técnico NUREG/CR-5535/Rev 3 Vol VIII, 2006c.
- Kakac S. y Bon B. A review of two-phase flow dynamic instabilities in tube boiling systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (51), 2008.
- Lahey R.T. *The Thermal Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor*. American Nuclear Society, 1977.
- Lahey R.T., editor. *Boiling Heat Transfer: Modern Developments and Advances*. Elsevier, 1992.
- Lee C.C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller—part I. *IEEE Transactions of Systems, Man and Cybernetics*, 2(9), 1990.
- Marcel C., Bonetto F., y Clausse A. Simulación del fenómeno de ebullición nucleada y flujo crítico de calor utilizando autómatas celulares y geométricos. *Mecánica Computacional*, XXI, 2002.
- Mitchell M., Oldham J., y Samuel A. *Advanced Linux Programming*. New Riders, 2001.
- Mochizuki H. Experimental and analytical studies of flow instabilities in pressure tube type heavy water reactors. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1(29), 1992.
- Rizwan-Uddin y Dorning J.J. Some nonlinear dynamics of a heated channel. *Nuclear Engineering and Design*, (93), 1986.
- Shieh A., Ransom V., y Krishnamurthy R. RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume 6: Validation of numerical techniques. Informe Técnico NUREG/CR-5535/Rev 3 Vol VI, 2006.
- TECNA S.A. Informe técnico 10105-G-IT-001 - RELAP-CPL: Extensión del código RELAP para permitir la realización de simulaciones termofluidodinámicas acopladas con códigos de cálculo externos. 2009.
- Theiler G. *Controladores basados en lógica difusa y loops de convección natural caóticos*. Proyecto Integrador de la Carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, 2007.
- Theiler G. *Análisis no lineal de inestabilidades en el problema acoplado termohidráulico-neutrónico*. Tesis de la Carrera de Maestría en Ingeniería, Instituto Balseiro, 2008.
- Van Bragt D. y Van der Hagen T. Stability of natural circulation boiling water reactors: part I—description of stability model and theoretical analysis on terms of dimensionless groups. *Nu-*

- clear Technology*, (121), 1998.
- Wall K., Watson M., y Whitis M. *Linux Programming Unleashed*. SAMS, 1999.
- Zadeh L. Fuzzy sets. *Information and Control*, (8), 1965.
- Zanocco P., Delmastro D., y Giménez M. Consideraciones numéricas en la predicción de límites de estabilidad en circuitos de convección natural. *Mecánica Computacional*, XXIII, 2004.
- Zanotti A., Méndez C., Nigro N., y Storti M. A preconditioning mass matrix to avoid the ill-posed two-fluid model. *Journal of Applied Mechanics*, 74(4), 2007.