

01193



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ACOPLAMIENTO DE MODELOS MECANÍSTICOS A  
CÓDIGOS DE INGENIERÍA NUCLEAR PARA ANÁLISIS  
DE MEJOR ESTIMACIÓN.

**T E S I S**  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
**DOCTOR EN INGENIERÍA**  
CAMPO DEL CONOCIMIENTO  
EN ENERGÍA  
P R E S E N T A:  
ARSENIO PROCOPIO LOPEZ

DIRECTOR:  
DR. JAIME B. MORALES SANDOVAL



CIUDAD UNIVERSITARIA

2005

m345090



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Agradezco a mis revisores de tesis: Dr. Juan Luis Francois Lacouture, Dr. Miguel Ceceñas Falcón, Dr. Gilberto Espinosa Paredes, Dra. Cecilia Martín del Campo, Dr. Arturo Reinking Cejudo y Dr. Carlos Chávez Mercado.

A todas las personas que participaron en las distintas etapas de este proyecto y que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este trabajo. Mi agradecimiento especial al Dr. Jaime B. Morales Sandoval por la dirección, sugerencias y aportaciones.

A la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico e institucional.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.  
NOMBRE: ARSENIO PROCOPIO LÓPEZ  
FECHA: 8 JUNIO 2005  
FIRMA: 

ACOPLAMIENTO DE MODELOS  
MECANÍSTICOS A CÓDIGOS DE  
INGENIERÍA NUCLEAR PARA  
ANÁLISIS DE MEJOR ESTIMACIÓN.

## Resumen

El desarrollo continuo de la tecnología de las computadoras ha permitido el uso de códigos acoplados para realizar mejores estimaciones en centrales nucleares. En este trabajo se presenta una metodología de acoplamiento para la parte más sólida de dos de los códigos más utilizados y ampliamente validados en la industria nuclear: la neutrónica de RAMONA y la termohidráulica de TRAC.

La arquitectura de acoplamiento consiste en una plataforma de PCs configuradas en una red de área local. La sincronización en tiempo y espacio de los modelos de cada código se realizó con el software PVM. La parte importante de la metodología propuesta es la sincronización del tiempo global de simulación sin modificar los métodos numéricos individuales. Se utilizó la interpolación lineal para sincronizar los tiempos de simulación de la neutrónica y termohidráulica de RAMONA y TRAC.

En este esquema, la propuesta inicial fue acoplar directamente RAMONA y TRAC. Los resultados obtenidos fueron oscilaciones de potencia en el proceso de acoplamiento y tiempos de CPU esperados pero que estaban fuera del alcance del tiempo real de simulación.

Se optó entonces por otro esquema: el acoplamiento indirecto de RAMONA y TRAC. En esta nueva propuesta se sustituye el componente CHAN de TRAC por un modelo más adecuado a los requerimientos de acoplamiento. El modelo consta de 4 ecuaciones de conservación y mejores correlaciones para evaluar algunos términos fuente en las ecuaciones de conservación. El acoplamiento indirecto se verificó con tres transitorios y se comparó con RAMONA. Los casos modelados son: movimiento de barras, perturbación del agua de alimentación y oscilación por ondas de densidad. Los resultados obtenidos son mejores respecto al tiempo de CPU requerido. La desviación máxima encontrada en estas tres pruebas fue de 12% respecto a RAMONA original.

La validación del acoplamiento indirecto, utilizando benchmarks de la literatura abierta, no se consideró en el programa de investigación. Sin embargo, es un trabajo subsecuente que permitirá cuantificar los beneficios de este tipo de sistemas avanzados en las centrales nucleoelectricas. Se presume que se reducirán las incertidumbres, respecto a RAMONA-3B original y tendrá capacidades similares o mejores a los códigos acoplados TRAC-M, TRAC/NEM y TRAC/ENTREE, debido a las mejores correlaciones que se implementaron para evaluar los parámetros del modelo de Drift Flux como el coeficiente de distribución y la velocidad relativa de fases. Otras mejoras se realizaron en las correlaciones para evaluar las propiedades físicas del agua, encamisado y combustible.

## **Abstract**

The initial objective of this project was to directly couple the RAMONA and TRAC codes running on different PCs. The idea was to use the best part of each one and eliminate some of their limitations and widen the applicability of these codes to simulate different BWR and system components. It was required to try to minimize the amount of changes to present code subroutines and calculation procedures. If possible, just substitute values obtained in the parallel code.

Preliminary results indicated that using a CHAN component of TRAC to model thermal-hydraulic phenomena for each neutronic channel modeled in RAMONA is rather difficult. Large amounts of CPU time consumption are required and lots of PCs would make this solution difficult, besides considerable large transients are introduced by the differences in thermal-hydraulic results of these codes. The substitution of the thermal hydraulics of RAMONA, by the TRAC channel calculations, is possible but simulation of a null transient on both codes must be planned and a gradual change must be controlled by an additional supervisory subroutine.

An indirect coupling of these codes, it is therefore proposed, in order to eliminate most of these limitations. In this indirect coupling, a thermal-hydraulic model of the average tube in a bundle and the global channel cooling fluid dynamics is programmed for each neutronic channel while the global reactor vessel and core is modeled by TRAC with just four channels and four rings. Results are more reliable, coupling is simpler and faster simulations are possible.

## Contenido

AGRADECIMIENTOS .....	I
RESUMEN .....	III
ABSTRACT .....	IV
CONTENIDO .....	V
NOMENCLATURA .....	VII
LISTA DE TABLAS .....	X
LISTA DE FIGURAS .....	X

### **Capítulo 1 INTRODUCCION**

1. 1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1. 2 TRABAJOS RELACIONADOS .....	3
1. 3 OBJETIVO GENERAL .....	6
1. 4 ALCANCE .....	6
1. 5 METODOLOGÍA .....	7

### **Capítulo 2 DESCRIPCION DE TRAC Y RAMONA**

2. 1 DESCRIPCIÓN DE TRAC .....	9
2. 2 DESCRIPCIÓN DE RAMONA .....	14
2. 3 ESTRUCTURA DE TRAC Y RAMONA .....	15
2. 4 DESCRIPCIÓN DE PVM .....	19
2. 5 CONCLUSIONES .....	20

### **Capítulo 3 ACOPLAMIENTO DIRECTO DE RAMONA Y TRAC**

3. 1 DEFINICIÓN DE ACOPLAMIENTO PARA RAMONA Y TRAC .....	22
3.1.1 REQUERIMIENTOS .....	22
3.1.2 METODOLOGÍA .....	23
3.1.3 PRUEBAS PRELIMINARES .....	24
3. 2 PROPUESTA DE ACOPLAMIENTO .....	28

3.3	DISEÑO DE PRUEBAS DE ACOPLAMIENTO .....	29
3.4	DESCRIPCIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE PRUEBAS.....	31
3.4.1	PRUEBA PARA DETERMINAR LAS DIFERENCIAS ENTRE LOS MODELOS TERMOHIDRÁULICOS DE TRAC Y RAMONA (PRUEBA 1.1) .....	32
3.4.2	PRUEBA PARA SUSTITUIR EL MODELO TERMOHIDRÁULICO DE UN CANAL DE RAMONA POR EL MODELO TERMOHIDRÁULICO DE TRAC CON PVM (PRUEBA 1.2).....	41
3.5	CONCLUSIONES DEL ACOPLAMIENTO DIRECTO .....	52

## **Capítulo 4 ACOPLAMIENTO INDIRECTO DE RAMONA Y TRAC**

4.1	PROPUESTA DE ACOPLAMIENTO INDIRECTO.....	55
4.2	EL MODELO PARA LA TERMOHIDRÁULICA DE UN ENSAMBLE DE COMBUSTIBLE.....	56
4.3	VERIFICACIÓN DEL ACOPLAMIENTO INDIRECTO .....	62
4.3.1	TRANSITORIO DE MOVIMIENTO DE BARRAS (PRUEBA 2.0) .....	63
4.3.2	TRANSITORIO POR PERTURBACIÓN DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN (PRUEBA 3.0).....	68
4.3.3	TRANSITORIO POR ONDAS DE DENSIDAD (PRUEBA 4.0).....	71
4.4	CONCLUSIONES DEL ACOPLAMIENTO INDIRECTO .....	75

## **Capítulo 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	CONCLUSIONES.....	77
5.2	RECOMENDACIONES.....	78
APÉNDICE A	FUNCIONES PARA EVALUAR PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA.....	79
APÉNDICE B	ACOPLAMIENTO DE UN MODELO MECANÍSTICO PARA SIMULAR SISTEMAS PASIVOS DE SEGURIDAD.....	81
APÉNDICE C	INTERFAZ DE MATLAB CON EL S3D-BWR PARA MONITOREAR VARIABLES DE ESTADO EN "TIEMPO REAL DE CÁLCULO".....	83
APÉNDICE D	ARCHIVOS DE ENTRADA "INPUTS" PARA EL S3D-BWR.....	86
REFERENCIAS.....		87

## Nomenclatura

A	Area de flujo, $m^2$
$C_i$	Concentración de precursores,
$C_p$	Capacidad calorífica a presión constante, $J/kg \cdot K$
$C_{wg}$	Coefficiente de fuerzas cortantes entre la pared y la fase gas, $1/m$
$C_{wl}$	Coefficiente de fuerzas cortantes entre la pared y la fase líquida, $1/m$
D	Coefficiente de difusión, $m^2/s$
$D_H$	Diámetro hidráulico, m
d	Diámetro o diámetro equivalente, m
e	Energía interna específica, $J/kg$
$f_i$	Factor de fricción interfacial, $N/m^3$
$f_{IF}$	Factor de arrastre de la interfaz con la fase líquida, $1/s$
$f_{IG}$	Factor de arrastre de la interfaz con la fase gas, $1/s$
$f_{WF}$	Factor de arrastre de la pared con la fase líquida, $1/s$
$f_{WG}$	Factor de arrastre de la pared con la fase gas, $1/s$
G	Flux de masa, $kg/s \cdot m^2$
g	Aceleración de la gravedad, $m/s^2$
Gr	Número de Grashof, adimensional
$h_{fg}$	Calor latente de vaporización, $J/kg$
Ja	Número de Jakob, adimensional
j	Flux volumétrico, $m/s$
k	Conductividad térmica, $W/m \cdot K$
$k_{vm}$	Coefficiente de masa virtual, $1/K \cdot s$
Le	Número de Lewis, adimensional
M	Masa molecular, $kg/kgmol$
Un	Número de Nusselt, adimensional
P	Presión, Pa
Pe	Número de Peclet, adimensional
Pr	Número de Prandtl, adimensional
$q'$	Flujo de calor por unidad de longitud, $W/m$
$q''$	Flujo de calor por unidad de área, $W/m^2$
$q'''$	Flujo de calor por unidad de volumen, $W/m^3$
Q	Flujo de calor, W
$Q_{wg}$	Flujo de calor volumétrico de la pared hacia la fase gas, $W/m^3$
$Q_{wl}$	Flujo de calor volumétrico de la pared hacia la fase líquida, $W/m^3$
$Q_{ig}$	Flujo de calor volumétrico de la interfaz hacia la fase gas, $W/m^3$
$Q_{il}$	Flujo de calor volumétrico de la interfaz hacia la fase líquida, $W/m^3$
$Q_{dg}$	Flujo de calor volumétrico directo depositado en la fase gas, $W/m^3$
$Q_{dl}$	Flujo de calor volumétrico directo depositado en la fase líquida, $W/m^3$
R	Constante universal de los gases, $(Pa \cdot m^3)/(kgmol \cdot K)$
$r_H$	Radio hidráulico, m
$r_g$	Densidad real, $kg/m^3$
Re	Número de Reynolds, adimensional
Ri	Número de Richardson, adimensional
Sc	Número de Schmidt, adimensional
Sh	Número de Sherwood, adimensional
St	Número de Stanton, adimensional
T	Temperatura, K
$T_\infty$	Temperatura del refrigerante en la corriente libre, K

$T_i$	Temperatura en la interfaz, K
$t$	Tiempo, s
$V$	Velocidad, m/s
$V_z$	Velocidad en la dirección z, m/s
$V_y$	Velocidad en la dirección y, m/s
$v_{fg}$	Volumen específico por cambio de fase, m <sup>3</sup> /kg
$V_{fi}$	Velocidad de la fase líquida en la interfaz, m/s
$V_{gi}$	Velocidad de la fase gas en la interfaz, m/s
$W$	Flujo de masa, kg/s
$We$	Número de Weber, adimensional
$X$	Fracción masa, adimensional
$x$	Fracción mol, adimensional

### Símbolos griegos

$\alpha$	Fracción de vacíos (fracción en volumen de la fase gas), adimensional
$\beta$	Fracción de neutrones retardados, adimensional
$\phi^2$	Factor multiplicador (de fricción) para flujo en dos fases
$\Gamma$	Flujo de masa volumétrico, kg/s·m <sup>3</sup>
$\Gamma_{ig}$	Transferencia de masa volumétrica desde la interfaz hasta la fase gas, kg/s·m <sup>3</sup>
$\varphi_1, \varphi_2$	Flux de Neutrones, grupo rápido y térmico respectivamente, adimensional
$\lambda$	Constante para los neutrones retardados
$\mu$	Viscosidad, kg/m·s
$\nu$	Viscosidad cinemática, m <sup>2</sup> /s
$\nu_1, \nu_2$	Número de neutrones por fisión, adimensional
$\rho$	Densidad, kg/m <sup>3</sup>
$\Sigma_F$	Sección eficaz de los neutrones de fisión, m <sup>2</sup>
$\sigma$	Tensión superficial o de interfaces, N/m
$\tau$	Esfuerzo cortante, N/m <sup>2</sup>

### Subíndices y superíndices

C	Fase continua
D	Fase dispersa
g	Fase gas
i	Valor en la interfaz o valor inicial
l	Fase líquida
m	Propiedades de mezcla o valor promedio
s	Propiedades de saturación
t	Total
v	Vapor
w	Propiedades en la superficie de la pared

## **Siglas y abreviaturas**

BWR	Reactor nuclear de agua hirviente (Boiling Water Reactor)
CLV	Central nucleoelectrica de Laguna Verde
ECCS	Sistemas de enfriamiento de emergencia para el núcleo (Emergency Core Cooling Systems)
ISP	International Standard Problem (ISP)
LOCA	Accidente de Pérdida de Refrigerante (Loss-of-coolant accident)
LWR	Reactor de Agua Ligera (Light Water Reactor)
PC	Computadora Personal (Personal Computer)
PCCS	Sistema de Enfriamiento Pasivo del Contenedor (Passive Containment Cooling System)
PSU	Universidad del Estado de Pennsylvania (Penn State University)
RAMONA	Código de Análisis para reactores BWR con neutronics 3D.
S3D-BWR.1	Acoplamiento directo de RAMONA y TRAC con PVM.
S3D-BWR.2	Acoplamiento indirecto de RAMONA y TRAC con PVM.
SBWR	Reactor Simplificado de Agua Hirviente (Simplified Boiling Water Reactor)
TRAC	TRAC-BF1 versión 2000.1 de PSU; Código de Análisis para Transitorios en Reactores BWR (Transient Reactor Analysis Code)

## Lista de tablas

Tabla 2.1	Descripción de los módulos principales de TRAC.....	10
Tabla 2.2	Rutinas principales de TRAC para el cálculo de un transitorio.....	18
Tabla 2.3	Rutinas principales de RAMONA para el cálculo de un transitorio.....	18
Tabla 3.1	Configuración del entorno virtual.....	25
Tabla 3.2	Condiciones de frontera entre RAMONA y TRAC.....	26
Tabla 3.3	Tiempo requerido de CPU para simular ensambles de combustible con TRAC.....	26
Tabla 3.4	Pruebas para el acoplamiento directo de RAMONA y TRAC (S3D-BWR. 1).....	29
Tabla 3.5	Comparación del estado estacionario obtenido con el modelo termohidráulico de TRAC y RAMONA.....	41
Tabla 4.1	Esquema para el acoplamiento indirecto de TRAC y RAMONA (S3D-BWR.2).....	55
Tabla 4.2	Tiempo de CPU requerido para modelar un ensamble de combustible con el modelo CTH.....	62
Tabla 4.3	Transitorios para verificar el acoplamiento indirecto de RAMONA y TRAC.....	62
Tabla D.1	Archivo de entrada "input" para el modelo TH3D.....	86
Tabla D.2	Archivo de entrada "input" para el modelo N3D.....	86
Tabla D.3	Archivo de entrada "input" para el modelo RPV3D.....	86

## Lista de figuras

Figura 2.1	Diagrama de flujo simplificado de TRAC.....	16
Figura 2.2	Diagrama de flujo simplificado de RAMONA.....	17
Figura 3.1	Acoplamiento de los métodos numéricos de RAMONA y TRAC.....	23
Figura 3.2	Tiempo requerido para simular ensambles de combustible con TRAC.....	27
Figura 3.3	Esquema para el acoplamiento directo de TRAC y RAMONA (S3D-BWR. 1).....	28
Figura 3.4	Condiciones de frontera desde el módulo N3D hacia el módulo TH3D.....	30
Figura 3.5	Condiciones de frontera desde el módulo TH3D hacia el módulo N3D.....	31
Figura 3.6	Condiciones de frontera entre los módulos TH3D y RPV3D.....	31
Figura 3.7	Perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA.....	33
Figura 3.8	Evolución de los perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA e interpolados en TRAC para las celdas 1 y 25.....	34
Figura 3.9	Perfiles de la potencia de decaimiento obtenidos con RAMONA.....	34
Figura 3.10	Evolución de los perfiles de la potencia de decaimiento obtenidos con RAMONA e interpolados en TRAC para las celdas 1 y 25.....	35
Figura 3.11	Presión del sistema obtenido con RAMONA.....	35
Figura 3.12	Comparación de la presión obtenidos con RAMONA y TRAC para las celdas 1 y 25.....	36
Figura 3.13	Perfiles de la temperatura de líquido obtenidos con RAMONA.....	36
Figura 3.14	Comparación de la temperatura de líquido obtenidos con RAMONA y TRAC para las celdas 1 y 25.....	37
Figura 3.15	Perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA.....	37
Figura 3.16	Comparación de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA y TRAC para las celdas 3 y 11.....	38
Figura 3.17	Evolución de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con TRAC y RAMONA para la celda axial 15 del canal hidráulico.....	39
Figura 3.18	Evolución de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con TRAC y RAMONA para la celda axial 19 del canal hidráulico.....	39

Figura 3.19	Evolución de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con TRAC y RAMONA para la celda axial 21 del canal hidráulico. ....	40
Figura 3.20	Evolución de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con TRAC y RAMONA para la celda axial 23 del canal hidráulico. ....	40
Figura 3.21	Condiciones iniciales para el transitorio de movimiento de barras. ....	42
Figura 3.22	Simplificación del núcleo del reactor (444 ensambles) a un cuarto de núcleo (111 ensambles) para modelarse con RAMONA y TRAC. ....	43
Figura 3.23	Perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA. ....	45
Figura 3.24	Perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA. ....	45
Figura 3.25	Perfiles de la temperatura de combustible obtenidos con RAMONA. ....	45
Figura 3.26	Perfiles de la temperatura de refrigerante obtenidos con RAMONA. ....	46
Figura 3.27	Perfil de la potencia térmica total obtenido con RAMONA. ....	46
Figura 3.28	Comparación de los perfiles obtenidos con TRAC y RAMONA. ....	47
Figura 3.29	Comparación de los perfiles obtenidos con el S3D-BWR. 1 y RAMONA. ....	48
Figura 3.30	Comparación de los perfiles obtenidos con el S3D-BWR. 1 y RAMONA. ....	49
Figura 3.31	Comparación de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con el modelo acoplado. Se compara el canal 1 (a la izquierda) y el canal adyacente 2 (a la derecha). ....	50
Figura 3.32	Comparación de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con el modelo acoplado. Se compara el canal 1 (a la izquierda) y el canal lejano 50 (a la derecha). ....	51
Figura 4.1	Representación de un elemento de combustible. ....	57
Figura 4.2	Perfiles de las variables de estado de la ECM y ECE. ....	61
Figura 4.3	Comparación de los perfiles obtenidos con el modelo CTH y RAMONA. ....	61
Figura 4.4	Perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA. ....	64
Figura 4.5	Perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA. ....	64
Figura 4.6	Perfiles de la temperatura de combustible obtenidos con RAMONA. ....	64
Figura 4.7	Perfiles de la temperatura de refrigerante obtenidos con RAMONA. ....	65
Figura 4.8	Perfiles obtenidos con RAMONA y CTH versión MATLAB. ....	65
Figura 4.9	Perfiles obtenidos con RAMONA y CTH versión FORTRAN. ....	66
Figura 4.10	Perfiles obtenidos cuando se acopla un canal del CTH a RAMONA. ....	67
Figura 4.11	Perfiles obtenidos con 111 canales acoplados del CTH a RAMONA. ....	67
Figura 4.12	Condiciones de estado estacionario antes del transitorio. ....	68
Figura 4.13	Perturbación de la temperatura del agua de alimentación (TFW). ....	69
Figura 4.14	Flujo volumétrico de alimentación obtenido con RAMONA. ....	69
Figura 4.15	Perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA. ....	70
Figura 4.16	Perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA. ....	70
Figura 4.17	Perfiles obtenidos con RAMONA y S3D-BWR.2. ....	71
Figura 4.18	Condiciones de estado estacionario antes del transitorio. ....	72
Figura 4.19	Perturbación del flujo volumétrico del agua de alimentación (WWFW). ....	72
Figura 4.20	Potencia térmica total obtenida con RAMONA. ....	73
Figura 4.21	Perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA. ....	73
Figura 4.22	Perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA. ....	74
Figura 4.23	Comparación de los perfiles obtenidos con RAMONA y S3D-BWR.2. ....	75
Figura A.1	Comparación de los perfiles obtenidos con las correlaciones y ASME. ....	80
Figura B.1	Condiciones de frontera para el acoplamiento del sistema PCCS. ....	82
Figura C.1	Ejemplo de interfaz para monitorear variables y/o arreglos desde otra PC. ....	83

Capítulo 1:

# *Introducción*

En este capítulo se presenta una revisión del estado del arte en la modelación de reactores nucleares con neutrónica y termohidráulica 3D. Se describe la problemática que se presenta al estimar el comportamiento de las nuevas centrales eléctricas y se presenta una propuesta para minimizar este problema. La propuesta de este trabajo es acoplar dos de los mejores códigos de ingeniería nuclear utilizando técnicas de programación distribuida y paralela. Posteriormente se describe el objetivo y alcance de este trabajo. Al final se presenta en forma gráfica la metodología utilizada para el proyecto.

## 1. 1 Descripción del problema

Actualmente la industria nuclear está desarrollando metodologías de mejor estimación para evaluar los diseños de las centrales nucleoelectricas (por modificaciones a las ya existentes o por nuevos conceptos en los diseños de reactores avanzados). Sin embargo, los códigos de ingeniería para análisis de eventos (transitorios y de accidente) aún están en proceso de mejora, lo mismo que el desarrollo de modelos mecanísticos de fenómenos específicos. Esto, aunado a la explosiva disponibilidad de capacidad de procesamiento en estaciones de trabajo y en computadores personales, aumenta la posibilidad de utilizar el procesamiento distribuido con las mejores opciones de modelado para cada uno de los sistemas o componentes de la central a evaluar.

Con los códigos de ingeniería actuales, las condiciones de frontera de los modelos se especifican como mejores estimados y se tabulan o se calculan fuera de línea del proceso de simulación de la central estudiada. Esto introduce incertidumbre en la evaluación de los parámetros de seguridad de la central y podrían estar eliminando pequeñas retroalimentaciones hacia los modelos dinámicos y hacia las fronteras también. Por ejemplo, el análisis de accidentes base de diseño con pérdida de refrigerante denominados LOCA en reactores BWR es frecuente modelarlo con presiones en la contención primaria que no tienen la dinámica de los procesos de transferencia que ocurren allí. Similarmente, la respuesta de la contención tiene flujos y presiones que provienen de simulaciones (en circuito abierto) que no incluyen retroalimentaciones detalladas. Por otra parte, el modelado de flujos bifásicos en tres dimensiones espaciales (3D) y dependientes del tiempo, con códigos de dinámica de fluidos, es cada día más certero para configuraciones con bajo número de celda.

RAMONA<sup>1</sup> es un código que fue diseñado para modelar los fenómenos básicos de neutrónica espacial que ocurren en reactores tipo BWR, para lo cual cuenta con un modelo de la vasija, líneas de vapor y sistemas de control principales. Sin embargo, los modelos termohidráulicos de RAMONA son de alcance muy limitado ya que sólo evalúan una presión en el reactor, un circuito de recirculación, no pueden tener flujo bifásico en varias partes del reactor, no pueden modelar flujo a contracorriente y sólo existe vapor saturado donde es permitido.

Por otra parte, TRAC<sup>2</sup> es un código que puede modelar los fenómenos termohidráulicos que ocurren en un reactor aún en condiciones extremas. Sin embargo, tiene una cinética nuclear muy limitada (puntual o unidimensional) por lo que no puede ser usado para modelar oscilaciones y otros eventos que requieren una mejor estimación de la distribución espacial de potencia.

---

<sup>1</sup> En este trabajo, RAMONA se refiere al código RAMONA-3B versión 1984

<sup>2</sup> En este trabajo, TRAC se refiere al código TRAC-BF1 versión 2000.1

Existen varios proyectos en la comunidad nuclear internacional para obtener herramientas computacionales y modelar la cinética de neutrones y la termohidráulica en tres dimensiones. En este esquema, resulta de gran interés el poder ampliar el espectro de aplicabilidad de los códigos de ingeniería nuclear y contar con herramientas que tengan márgenes de incertidumbre más bajos.

Este trabajo es una respuesta al reto de poder simular las centrales nucleoelectricas con métodos que posean menor incertidumbre. Para lograr esta meta se propone utilizar el modelo de la neutronics 3D de RAMONA y el modelo termohidráulico 3D de TRAC. El método propuesto es acoplar estos dos códigos utilizando transferencia de mensajes (condiciones de frontera) entre ambos códigos mediante la programación distribuida y/o paralela.

Los trabajos relacionados, la metodología utilizada, la propuesta y verificación del acoplamiento son presentados en cinco capítulos. La sección 1.2 describe los trabajos que actualmente se están realizando en la comunidad internacional para obtener mejores modelos de la termohidráulica y la neutronics. El capítulo 2 describe los modelos de TRAC y RAMONA, el método numérico de solución y las principales restricciones. En el capítulo 3 se presenta la metodología propuesta para el acoplamiento directo de RAMONA con TRAC y se describe las pruebas más importantes para la verificación. En el capítulo 4 se presenta una alternativa de acoplamiento para obtener simulaciones con mejores características. El capítulo 5 resume los resultados más importantes obtenidos y las conclusiones.

## **1. 2 Trabajos relacionados**

Para la próxima generación de reactores, la industria nuclear ha impuesto mayores requerimientos en el diseño y operación de las centrales nucleoelectricas. El Departamento de Energía de los Estados Unidos de América (USA) comprometido con el gobierno, la industria y la investigación alrededor del mundo convocó a una gran discusión para el desarrollo de la próxima generación de sistemas de energía nuclear conocidas como "generación IV", Magwood (2000) y NERI (2003).

Esta generación deberá satisfacer y ofrecer ventajas en las áreas de sustentabilidad, seguridad y ser económicos y podrían estar operando comercialmente por el año 2030. Los objetivos que deben cumplir son:

- Ciclos de combustible que podrían/deberían mantener un aire limpio y una utilización efectiva del combustible para la producción de energía en el mundo.

- Minimizar y manejar sus propios residuos nucleares y promover una autonomía de recarga.
- Incluir ciclos de combustible más eficientes/attractivos para disminuir la proliferación de armas.
- La operación de las nuevas centrales debe superar y ser un ejemplo en seguridad y confiabilidad.
- Una baja probabilidad de daño al núcleo del reactor.
- Deberán eliminar la necesidad de un sitio de respuesta de emergencia al exterior de la planta.
- Deberán ser más económicos en el ciclo de vida de combustible.
- Deberán tener un riesgo financiero equivalente a otros proyectos de energía.

Dentro del rubro de seguridad, la próxima generación de reactores incorpora en su diseño sistemas pasivos de seguridad; un claro ejemplo es el Reactor Simplificado de Agua Hirviendo (SBWR). El reactor SBWR conserva características del modelo anterior (ABWR) y otras las ha mejorado, reduciendo con esto costos y aumentando la seguridad de la planta. Rao (1994) y Upton et al. (1996) han presentado las más sobresalientes innovaciones al reactor SBWR. Un objetivo fundamental, de los códigos acoplados actualmente, es la posibilidad de modelar los nuevos componentes de los reactores de la próxima generación. En este trabajo se presenta una metodología para acoplar un modelo mecanístico que modela los sistemas pasivos de seguridad de los reactores SBWR (apéndice B).

Debido a la constante evolución y desarrollo de los reactores es necesario la actualización del software existente. Alrededor del mundo se han iniciado y concluido un gran número de proyectos para obtener mejores herramientas en el modelado de las plantas nucleares. Durante los últimos años, el acoplamiento de diferentes códigos con neutrónica 3D como: BIPR8 (para modelar transitorios en núcleos con geometría hexagonal), DYN3D (para geometría hexagonal), KIKO-3D (para geometría cartesiana y hexagonal), QUABOX/CUBBOX (para geometría cartesiana) y ENTREE/NEM (USA) se han acoplado a códigos termohidráulicos como ATHLET y TRAC para modelar reactores LWR, VVER, y RBMK (Akitoshi et al., 2000; Cacuci, 2000; Grandrille et al., 2000; Mittag et al., 2000; Nadejda and Kostadin, 2001).

Langenbuch et al. (2000) presenta un resumen de códigos con neutrónica 3D acoplados a códigos de dinámica de fluidos. Los objetivos son obtener menores márgenes de incertidumbre para modelar eventos tales como: dilución de boro, transitorios ATWS, transitorios con reactividad negativa debido a la temperatura del moderador y transitorios de estabilidad. Los resultados obtenidos con los códigos acoplados fueron comparados con el Benchmark de ruptura en la línea principal de vapor de la OECD/CSNI; así como con datos obtenidos en la operación de plantas con resultados satisfactorios.

En el proyecto de la Agencia Nuclear de Energía: NEA-1467 (Petrie y Lansers, 1984; Ramon y Pena, 1994), se incorpora el código KENO-Va en un entorno de memoria compartida. El código KENO-Va modela el transporte de neutrones con la ecuación de Boltzmann en 3D utilizando la técnica de Monte Carlo. Se han realizado varias pruebas de ejecución de transitorios en una serie de 4 computadoras con memoria compartida disminuyendo el tiempo de ejecución respecto al código original. También se han realizado pruebas en un cluster FDDI de 6 equipos HP9000/735 usando el software *Parallel Virtual Machine* (PVM) reduciendo el tiempo de ejecución.

En el proyecto NEA-1577 (Zimin y Ninokata, 1998a; Zimin et al., 1998b; Asaka et al., 2000) se integró el código SKETCH en un entorno virtual con PVM. SKETCH resuelve la ecuación de difusión de neutrones en geometría cartesiana para el estado estacionario y transitorio con el método nodal analítico - semianalítico. El código puede tratar un arbitrario número de grupos de energía y neutrones precursores retardados. El código en paralelo ha sido comparado con el Benchmark de inserción y caída de barra de control (NEA-CRP) con resultados satisfactorios.

En el proyecto NEA-1593 (Alloggio et al., 1996; Basile et al., 1997) se obtuvo una nueva versión del código TRAC para reactores PWR la cual se le denomina TRAC-PWR en MOD3. Este código se ha acoplado a la cinética de neutrones de dos grupos tridimensional del código QUANDF para aplicaciones de estado estacionario crítico y subcrítico. El tiempo de ejecución para modelar un transitorio de caída de barra (4400 nodos neutrónicos en un cuarto de núcleo) incluyendo la vasija (384 nodos hidráulicos) es de 170 minutos en una PC con procesador 486.

La comisión reguladora de Estados Unidos (USNRC, Mahaffy et al., 2000a, 2000b, 2000c) ha desarrollado un código de análisis termohidráulico (TRAC-M) que consolida las capacidades de TRAC-P, TRAC-B, RAMONA, y RELAP5. Uno de los requerimientos es que debe soportar la capacidad de cálculo en paralelo para extender la funcionalidad y mejorar la velocidad de ejecución. En este esquema se han probado varias aplicaciones para plataforma de multiprocesador y diferentes sistemas operativos.

Para mejorar la sincronización y optimización del código acoplado TRAC-BF1/NEM/COBRA-TF, se desarrolló e implementó un algoritmo temporal de acoplamiento (Solís et al., 2002). El esquema de acoplamiento denominado "multinivel" para la sincronización de TRAC-BF1/NEM, COBRA-TF y PVM, se desarrolló considerando los diferentes algoritmos de selección del tamaño de paso en cada código. Esta metodología permite la sincronización sin modificaciones apreciables en los códigos. Este desarrollo permite estimar en línea el comportamiento de las temperaturas y potencia en las pastillas de combustible y barras individuales de canales selectos.

En el trabajo de Birol (2003) se presenta una mejora para modelar flujo vertical en dos fases y en especial cuando se tiene flujo estratificado con interfaces líquido-gas. Se

demonstró que utilizar fracciones de vacío promedio para cada celda axial computacional es inadecuado. Se propone entonces dividir cada celda en dos regiones con distinto patrón de flujo y fracción de vacíos. Aunque la idea de monitorear las regiones individuales no es nueva, su aplicación a los códigos de mejor estimación no fue exitosa en el pasado por modificaciones inapropiadas a las ecuaciones de conservación. Birol propuso un método sistemático para monitorear las interfaces en una y tres dimensiones para las ecuaciones de conservación del código TRAC-M de la USNRC.

### 1.3 Objetivo general

Obtener una herramienta computacional, que permita realizar mejores estimaciones para las centrales nucleoelectricas tipo BWR actuales o en diseño (ABWR, SBWR o similares), mediante la simulación acoplada de códigos *Best-Estimate* (BE), modelos mecanísticos y modelos de mecánica de fluidos.

Objetivos específicos:

- Establecer una metodología para acoplar TRAC y RAMONA utilizando técnicas de programación distribuida y paralela.
- Acoplar el modelo termohidráulico de TRAC con el modelo neutrónico de RAMONA.
- Verificar el acoplamiento de TRAC y RAMONA.
- Evaluar la metodología que se propone para acoplar TRAC y RAMONA.
- Desarrollar y acoplar modelos mecanísticos, que modelen partes críticas de una central, utilizando la metodología propuesta.

### 1.4 Alcance

Uno de los objetivos específicos de este trabajo es evaluar la metodología que se propone para acoplar TRAC y RAMONA. Para evaluar la propuesta no se requiere de acoplar todos los modelos importantes de una planta nucleoelectrica, ni tampoco modelar una central específica. Por lo tanto el alcance de este trabajo fue:

- Acoplar sólo los modelos termohidráulico de TRAC y neutrónico de RAMONA.

- Diseñar un esquema de acoplamiento para otros modelos importantes de una central nucleoelectrica como el modelo de balance de planta BOP, el modelo de los sistemas de control, el modelo de los sistemas de emergencia y el modelo de la contención.
- Describir una propuesta de acoplamiento para una central nucleoelectrica BWR, la cual posteriormente podrá implementarse en procesadores distribuidos y paralelos.
- Determinar si es necesario incluir un modelo mecanístico que permita evaluar la metodología de acoplamiento así como estudiar la posibilidad de agregar otros modelos al sistema acoplado. El resultado fue que se agregó un modelo para simular los sistemas pasivos de seguridad.

## 1.5 Metodología

La metodología consiste en utilizar de cada código lo mejor, utilizar la neutronics de RAMONA y la termohidráulica de TRAC, y permitir el intercambio de información para que ambos módulos se actualicen de acuerdo a los requerimientos de integración global. El acoplamiento requiere de modificaciones a los programas fuente y se estableció como requerimiento principal que las modificaciones a la estructura de los códigos sea mínima; con el fin de no perder el "pedigrí" de los códigos originales.

Los módulos de neutronics y termohidráulica se acoplan mediante la configuración maestro-esclavo en un ambiente de computación distribuida mediante el software *Parallel Virtual Machine* (PVM). En una primera propuesta se estableció que RAMONA controlará todo el proceso de acoplamiento. Posteriormente se encontró que era mejor utilizar un programa maestro exterior a TRAC y RAMONA para el acoplamiento de los códigos.

## Capítulo 2:

# *Descripción de TRAC-BF1 y RAMONA-3B*

Las características principales de los códigos de mejor estimación: TRAC y RAMONA se describen en este capítulo; haciendo énfasis en los modelos que se desean reemplazar/sustituir. Después se presenta la estructura computacional de cada código para la simulación de eventos transitorios y se indica el lugar donde pueden ser transferidos las variables dinámicas de intercambio entre ambos códigos. Al final del capítulo se describe brevemente el software para crear el ambiente virtual, PVM.

## 2. 1 Descripción de TRAC

TRAC es un programa de computadora que permite realizar análisis de mejor estimación para un amplio rango de transitorios y accidentes postulados tales como: roturas con pérdida de refrigerante y transitorios anticipados sin SCRAM<sup>3</sup>. Este código fue desarrollado en Idaho National Engineering Laboratory (INEL). La finalidad de su creación, es la de suministrar a la Comisión Nuclear Reguladora de Los Estados Unidos (USNRC), una herramienta computacional que proporcione una mejor estimación del comportamiento de los reactores de agua hirviente (BWR) en análisis de accidentes base de diseño con pérdida de refrigerante denominados LOCA (Loss-of-coolant accident). El código TRAC cuenta con los siguientes modelos:

- Modelo termohidráulico de dos fluidos el cual considera flujo no homogéneo y desequilibrio termodinámico en todas las partes del sistema BWR. Incluye un tratamiento tridimensional de la vasija del reactor.
- Modelo detallado de las barras de combustible del BWR, incluyendo un modelo de transferencia de calor por radiación entre los múltiples grupos de barras de combustible.
- Modelos de los componentes del reactor: contención, turbina, bombas de chorro, separadores de vapor, secadores y condensador.
- Modelo de los sistemas de control del reactor.
- Modelo de transporte de boro.
- Modelo de transporte de gases No Condensables (NC).
- Modelo de localización de nivel que incluye efectos bifásicos.

Una característica principal de este código es su diseño modular para simular transitorios. Los módulos principales de TRAC son PIPE, TEE, VALVE, BREAK, FILL, CONTAIN y VESSEL. El componente PIPE modela el comportamiento temporal del flujo en un ducto y en una sola dimensión con condiciones de frontera de presión y/o velocidad así como de temperaturas. Este componente suministra la capacidad para modelar cambios de área y la transferencia de calor a través de las superficies internas y externas de pared. Una selección amplia de materiales para tubería está disponible para representar el material del PIPE. La geometría se especifica por medio del volumen, altura de celda, el área de flujo y el diámetro hidráulico de cada interfaz. Los módulos principales de TRAC se describen en la siguiente tabla.

---

<sup>3</sup> SCRAM (Safety Control Rod Automatic Motion) es la inserción automática de las barras de control del núcleo, que permite el apagado rápido del reactor.

Tabla 2.1 Descripción de los módulos principales de TRAC.

Componente	Descripción	Características especiales
PIPE	Modela flujo en una dimensión en ductos o tubos.	Modela cambios de área en la dirección de flujo y transferencia de calor a través de las superficies de la pared.
BREAK/FILL	Provee fuentes o sumideros en las fronteras para componentes que son modelados en una dimensión.	BREAK modela una condición de frontera para la presión, FILL modela una condición de frontera para la velocidad.
CHAN	Simula uno o más combustibles del reactor.	Modela la transferencia de calor por radiación.
PUMP	Modela el flujo dentro de una bomba centrífuga.	El modelo calcula la caída de presión y velocidad angular como una función del flujo y las propiedades del fluido.
TEE	Modela el flujo en tres ramificaciones, dos de los cuales se encuentran en el mismo eje.	Modela el lado primario y secundario como dos componentes PIPE conectados.
VALVE	Modela el flujo en una válvula.	La válvula se modela mediante el control del área y diámetro hidráulico entre celdas.
VESSEL	Componente que modela la vasija del reactor, en donde se lleva a cabo la fisión del combustible.	Modela el flujo a través de la vasija del reactor en 3D espacial y dependiente del tiempo.
SEPD	Modela un separador para obtener un vapor de salida seco.	Provee un modelo mecanístico del fenómeno de separación.
CONTAN	Modela el contenedor del reactor.	Calcula la temperatura del fluido, presión y fracción de vacíos.
TURB	Modela el vapor conducido en una turbina.	Está basado en un componente TEE.

La estructura modular de TRAC permite simular sistemas hidráulicos de diferente grado de complejidad. Se puede modelar desde una simple tubería hasta una central completa. La restricción principal es que el número total de módulos y/o componentes sea menor a 100. La razón principal de esta limitación es el dimensionamiento de las variables codificadas en Fortran. En este código no se calcula explícitamente la solución de las ecuaciones de conservación dependientes del tiempo para el estado estacionario. Sin embargo, se pueden encontrar las condiciones de estado estacionario si se especifica en el archivo de entrada y en cuyo caso el código no ejecuta acciones de control o disparos de señales.

El componente VESSEL del código TRAC es particularmente importante ya que resuelve las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía dependientes del tiempo y para las tres dimensiones del espacio que corresponden a las regiones de la vasija del reactor. La nodalización de la vasija utiliza una representación cilíndrica donde el usuario establece niveles axiales, anillos radiales y secciones azimutales que definen volúmenes de control. Este componente permite establecer fronteras o limitantes al flujo del refrigerante en cada una de las caras de los volúmenes de control por medio de áreas de flujo especificadas en el archivo de definición de la vasija (input-deck). Pueden colocarse

barras de calor (heat slabs) que absorben o radian calor dependiendo de las condiciones termodinámicas. Estas barras de calor no se consideran como componentes separados sino que son internas al componente VESSEL. Los fluidos pueden salir o entrar a los volúmenes de control del VESSEL por medio de conectores. Los canales de combustible del núcleo del reactor así como los separadores de vapor, los secadores de vapor, tuberías de soporte y controles de las barras de control (CRD) se agregan al componente VESSEL por medio de más conectores. Sin embargo, todos ellos son considerados componentes unitarios del modelo de TRAC y se contabilizan hasta un máximo de 99.

Los canales de combustible se modelan por medio del componente CHAN el cual resuelve las ecuaciones de conservación dependientes del tiempo y en una dimensión espacial. El componente CHAN puede modelar la transferencia de calor de las barras de combustible agrupándolas de acuerdo a sus características termodinámicas y nucleares. Tres o más grupos de barras de combustible de un ensamble son usuales en el modelado de un canal. La envolvente del ensamble, conocida como canal también es modelada separadamente y puede tomar o ceder calor de acuerdo a las condiciones del refrigerante y de ella misma. En el caso de pérdida pronunciada de refrigerante o con una fracción de vacíos muy cercana a uno, las varillas de combustible y el canal del ensamble pueden ceder o tomar calor por radiación y para ello el usuario debe especificar factores de emisividad y de visión entre los diferentes grupos y el canal. En la implementación actual de un reactor BWR no se pueden representar cada uno de los canales de combustible ya que la cinética de neutrones y por ende la generación de energía es unidimensional (axialmente) y por que el número de componentes total de TRAC está limitado a 99. Por ello siempre se modela un grupo reducido de canales de combustible del núcleo y normalmente menor a 10, representando cada CHAN a un número de ensambles del reactor. La transferencia de calor en las varillas del combustible se modela radialmente resolviendo la ecuación de conducción en coordenadas cilíndricas que permiten describir a las pastillas de combustible, el espacio entre la pastilla y el encamisado conocido como holgura (gap) y el encamisado normalmente de Zircalloy. El usuario puede definir el número de nodos radiales para representar este proceso de conducción en cada uno de los grupos de barras que representan un ensamble. La transferencia de calor por el canal de combustible que rodea a los ensambles también se puede representar con un número de nodos determinado por el usuario.

TRAC tiene tres formas para describir el comportamiento neutrónico del núcleo del reactor. El primer método es mediante una tabla que se proporciona por el usuario (una tabla de potencia como función del tiempo). En el segundo, la potencia se determina al resolver la ecuación de cinética puntual y la ecuación de calor de decaimiento. En el tercer método, la potencia se determina al resolver las ecuaciones del modelo de difusión para 2 grupos dependientes del tiempo y descripción espacial unidimensional. Estos tres métodos de TRAC serán sustituidos por el modelo neutrónico 3D de RAMONA.

El modelo de TRAC para la termohidráulica es el modelo de dos fluidos. Las ecuaciones de conservación que describen el comportamiento termohidráulico de un ensamble de combustible son:

Conservación de masa para la mezcla<sup>4</sup>:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_g \rho_g V_g + \alpha_l \rho_l V_l) = 0 \quad 2.1$$

Conservación de masa para el vapor:

$$\frac{\partial (\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_g \rho_g V_g) = \Gamma_v \quad 2.2$$

Conservación de movimiento para el vapor:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_g}{\partial t} + k_{vm} \left( \frac{\rho_c}{\alpha_g \rho_g} \right) \frac{\partial}{\partial t} (V_g - V_l) + V_g \frac{\partial V_g}{\partial z} = \\ & - \frac{f_i}{\alpha_g \rho_g} (V_g - V_l) \cdot |V_g - V_l| - \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{C_{wg}}{\alpha_g \rho_g} V_g |V_g| + g - k_{vm} \left( \frac{\rho_c}{\alpha_g \rho_g} \right) V_D \cdot \frac{\partial}{\partial z} (V_g - V_l) \end{aligned} \quad 2.3$$

Conservación de movimiento para el líquido:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_l}{\partial t} + k_{vm} \left( \frac{\rho_c}{\alpha_l \rho_l} \right) \frac{\partial}{\partial t} (V_l - V_g) + V_l \frac{\partial V_l}{\partial z} = \\ & \frac{f_i}{\alpha_l \rho_l} (V_g - V_l) \cdot |V_g - V_l| - \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{C_{wl}}{\alpha_l \rho_l} V_l |V_l| + g - k_{vm} \left( \frac{\rho_c}{\alpha_l \rho_l} \right) V_D \cdot \frac{\partial}{\partial z} (V_l - V_g) \end{aligned} \quad 2.4$$

Conservación de energía para la mezcla:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\alpha_l \rho_l e_l + \alpha_g \rho_g e_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_l \rho_l e_l V_l + \alpha_g \rho_g e_g V_g) = \\ & P \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_l V_l + \alpha_g V_g) + Q_{wg} + Q_{wl} + Q_{dg} + Q_{dl} \end{aligned} \quad 2.5$$

<sup>4</sup> Para conocer el significado de las siguientes variables refiérase a la nomenclatura, al inicio de este trabajo.

Conservación de energía para el vapor:

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g e_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_g \rho_g e_g V_g) = -P \frac{\partial}{\partial z} (\alpha V_g) - P \frac{\partial \alpha}{\partial t} + Q_{wg} + Q_{dg} + Q_{ig} + \Gamma_g h_{fg} \quad 2.6$$

En las ecuaciones 2.1 y 2.2, los términos de izquierda a derecha representan: (1) La variación local de la masa de fase respecto al tiempo, (2) El flujo neto de masa de fase a través del volumen de control conocido como término convectivo y (3) La transferencia de masa interfacial entre la fase líquida y vapor.

Para las ecuaciones de conservación de momento (ec. 2.3 y 2.4), los términos de izquierda a derecha representan: (1) La variación local de momento de fase respecto al tiempo, (2) Término de masa virtual, (3) Flujo de momento neto de fase a través del volumen de control, (4) Fuerzas de fricción que actúan en la interfaz, (5) Fuerzas de presión neta actuando sobre la fase, (6) Fuerzas de fricción entre la pared y la fase, (7) Fuerzas por efecto de la gravedad y (8) Término de velocidad asociado con la masa virtual.

En las ecuaciones de energía (ec. 2.5 y 2.6), los términos de izquierda a derecha representan: (1) La variación local de energía de fase respecto al tiempo, (2) Flujo de energía neto de fase, (3) Término que considera el trabajo debido a la expansión o contracción de fase, (4) Transferencia de energía a la fase debido a las fuerzas de presión por unidad de volumen, (5) Transferencia de calor de la pared a la fase  $Q_{wg}$  y/o  $Q_{wl}$ , (6) Energía depositada directamente a la fase  $Q_{dg}$  y/o  $Q_{dl}$ , (7) Transferencia de energía de la interfaz a la fase  $Q_{ig}$  y/o  $Q_{il}$  y (8) Transferencia de energía debido a la transferencia de masa en la interfaz.

Este grupo de 6 ecuaciones requiere de relaciones auxiliares<sup>5</sup> para calcular los términos fuente. Estas relaciones auxiliares expresan el intercambio de masa, energía y momento entre cada fase con sus alrededores. Las relaciones auxiliares presentan una dependencia fuerte con el tipo de patrón de flujo. El código usa básicamente dos patrones de flujo, líquido con baja fracción de vacíos y vapor con alta fracción de vacíos, considerando zonas de transición entre estos dos patrones.

Se utiliza una descripción separada para la fase vapor y la fase líquida, el cual permite velocidades y temperaturas distintas entre las fases. La fase gas puede ser el vapor de agua o la mezcla formada por el vapor y el gas NC, en el último caso se incluye una ecuación adicional de conservación de masa para el gas NC. Se considera que la mezcla formada por el vapor y el gas NC se comporta como una mezcla de Gibbs-Dalton.

<sup>5</sup> Las relaciones auxiliares también se conocen como ecuaciones de cerradura o ecuaciones constitutivas.

En TRAC se resuelven las ecuaciones de conservación por diferencias finitas con un esquema numérico semi-implícito lo que permite el cálculo económico de sistemas transitorios. El método semi-implícito está sujeto al límite material de estabilidad de Courant al seleccionar el paso de tiempo. En todos los casos los términos implícitos se formulan para que sean lineales en las variables dependientes del nuevo tiempo. Una descripción completa se encuentra en el manual de TRAC (Borkowski et al., 1992).

## 2.2 Descripción de RAMONA

RAMONA forma parte del paquete FMS (Sistema para Administración de Combustible, por sus siglas en inglés) desarrollado por la compañía Scandpower para administración de combustible en reactores nucleares tipo BWR. Este código fue diseñado para predecir los parámetros cinéticos dependientes del tiempo y una representación 3D espacial en el núcleo del reactor.

El modelo termohidráulico de RAMONA es el modelo de flujo en dos fases unidimensional, no homogéneo y no en equilibrio termodinámico de cuatro ecuaciones de conservación. Las ecuaciones de conservación son: una de masa para el vapor, una de masa para la mezcla, una de momento para la mezcla y una de conservación de energía para la mezcla. Se utilizan ecuaciones constitutivas para los términos fuente de las ecuaciones de conservación. Este modelo termohidráulico de RAMONA será sustituido por el modelo termohidráulico 3D de TRAC.

El modelo neutrónico de RAMONA predice la solución de las ecuaciones de difusión para dos grupos de energía con una aproximación de 1½ grupos. El término de la divergencia del flux térmico, en la ecuación 2.8, puede ser despreciado o aproximado por una función proporcionada por el usuario. La solución de las ecuaciones proporciona el flujo tridimensional espacial y temporal. El sistema de ecuaciones, que utiliza RAMONA para la difusión de neutrones, se presenta a continuación.

Ecuación de difusión para neutrones rápidos.

$$\frac{1}{v_1} \frac{\partial \phi_1}{\partial t} = \nabla \cdot D_1 \nabla \phi_1 - \sum_1 \phi_1 + (1 - \beta) \left[ v_1 \sum_{F1} \phi_1 + v_2 \sum_{F2} \phi_2 \right] + \sum_m \lambda_m C_m \quad 2.7$$

Ecuación de difusión para neutrones térmicos.

$$\frac{1}{\nu_2} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \nabla \cdot D_2 \nabla \varphi_2 - \Sigma_2 \varphi_2 + \Sigma_{21} \varphi_1 \quad 2.8$$

Precursores de los neutrones retardados para el grupo m.

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = \beta \left[ \nu_1 \Sigma_{F1} \varphi_1 + \nu_2 \Sigma_{F2} \varphi_2 \right] - \lambda_m C_m \quad ; m = 1,6 \quad 2.9$$

A diferencia de TRAC, el código RAMONA fue programado para modelar una central tipo BWR; en donde las condiciones de frontera, entre componentes, ya están definidas y no pueden modificarse por el usuario. Para modelar un transitorio, se inicia calculando una primera aproximación del estado estacionario. Y a partir de estos valores iniciales se calcula el transitorio con las condiciones de frontera fijas.

Al resolver las ecuaciones de la neutróica se utiliza el método numérico predictor-corrector. La cinética de neutrones determina el tiempo maestro de simulación. El transitorio en la temperatura de combustible y encamisado se sincroniza con los cálculos de cinética. Con el tiempo maestro de integración de la cinética se calcula los intervalos del tamaño de paso para las ecuaciones de la termohidráulica. Cada uno de estos sub-intervalos se determinan y controlan por separado para cumplir con los criterios de estabilidad de la termohidráulica. Después de realizar todos estos cálculos, la cinética se repite con los valores termohidráulicos recientes. Los resultados obtenidos son comparados con la primera predicción de cinética. Dependiendo de la cercanía en los valores predichos y calculados; los resultados: 1) son aceptados y se continúa con un nuevo paso de integración maestro ó 2) son rechazados y los cálculos son repetidos utilizando un tamaño de paso maestro más pequeño. Una mayor descripción de RAMONA se encuentra en el manual del usuario, (Wulff et. al, 1984a, 1984b; RAMONA, 1995).

## 2.3 Estructura de TRAC y RAMONA

En la figura 2.1 se presenta un diagrama de flujo simplificado del programa TRAC. En la parte derecha de esta figura se presenta el proceso para el cálculo del transitorio. La rutina TRANS es la encargada de iniciar el cálculo del transitorio y mantiene el control hasta que termina el transitorio. Las rutinas importantes en TRAC para el acoplamiento son: TRANS, FILX, BRKX y COR3.

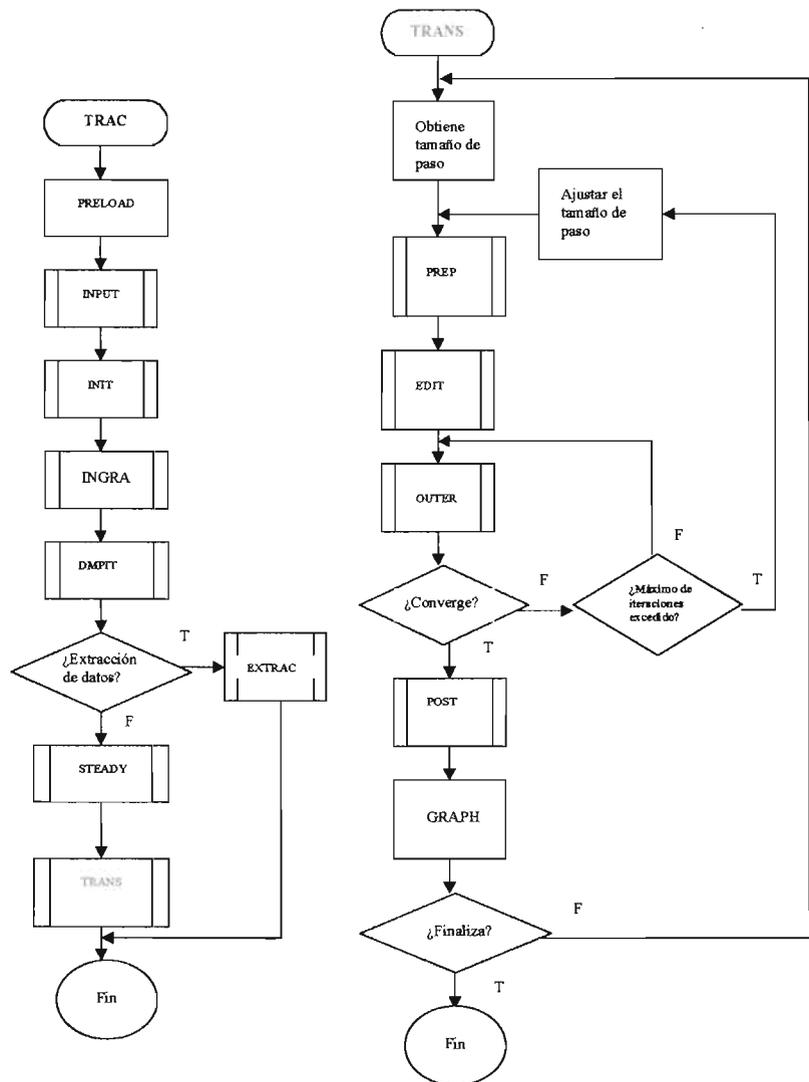


Figura 2.1 Diagrama de flujo simplificado de TRAC.

La rutina COR3 se encarga de actualizar los perfiles de potencia unidimensional de TRAC. Esta rutina es importante porque en esta parte del código se puede sustituir los perfiles que provienen de RAMONA. Por definición las rutinas FILX y BRKX determinan condiciones de frontera a la entrada y salida de cualquier módulo. Esta característica modular de TRAC permite realizar las modificaciones a estas rutinas para compartir e intercambiar condiciones de frontera hacia otros módulos de TRAC o hacia otros códigos.

En la figura 2.2 se presenta un diagrama de flujo simplificado del programa RAMONA. En este caso la rutina DYN es la encargada de iniciar y mantener el control del cálculo para un transitorio hasta alcanzar el tiempo de simulación deseado. Las rutinas importantes en RAMONA para el acoplamiento son: DYN, NUMINT, HIDRO1, HYDRO2 y PREDYN.

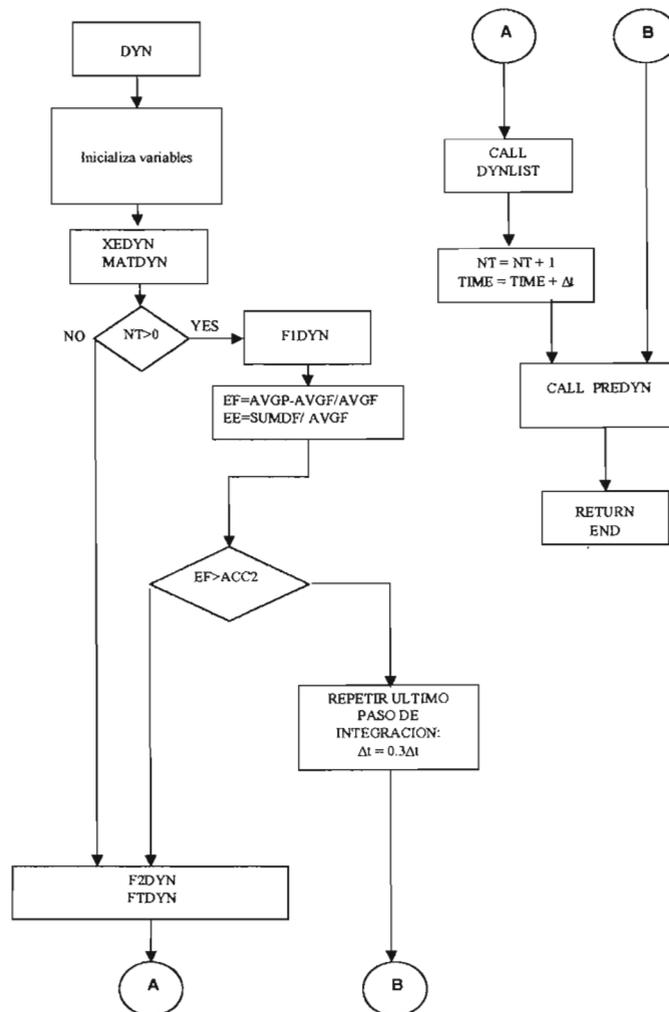


Figura 2.2 Diagrama de flujo simplificado de RAMONA.

La rutina NUMINT posee el control del cálculo termohidráulico de todos los componentes de la planta cuando se modela un transitorio. En las rutinas HYDRO1 e HYDRO2 se inician los cálculos termohidráulicos para cada tamaño de paso de integración neutrónico. Este lugar del código es el indicado para sustituir la termohidráulica de RAMONA. Sin embargo, para optimizar y mejorar la eficiencia de RAMONA es preferible utilizar la rutina NUMINT; sustituir los perfiles de RAMONA en esta parte del código permitirá, en un trabajo posterior, eliminar la parte termohidráulica de RAMONA. En la rutina PREDYN se predice dinámicamente la difusión de neutrones para cada tamaño de paso de integración neutrónico. Los valores predichos de la potencia inmediata y decaimiento se pueden enviar desde esta rutina hacia el modelo termohidráulico de TRAC.

En la tabla 2.2 se presenta una lista de las rutinas principales de TRAC. Las rutinas más importantes se encuentran a la izquierda de esta tabla, a la derecha de cada rutina se listan las rutinas a las que hace referencia. Por ejemplo la rutina COR1 hace

enlaces/llamadas a las rutinas FTRACE, TRIP, SECOND, MFROD, TSTP, TO FNMESH, FNMESH, SHRINK, EXPAND, SECOND y HTCOR.

Tabla 2.2 Rutinas principales de TRAC para el cálculo de un transitorio.

...	...
COR1	FTRACE, TRIP, SECOND, MFROD, TSTP, TO FNMESH, FNMESH, SHRINK, EXPAND, SECOND, HTCOR
COR3	FTRACE, TRIP, SECOND, FROD, EVALDF, TSTP, SECOND, RDLCM1, RDLCM, WRLCM
...	...
OUT1D	FTRACE, RDLCM, ERROR, CHN2, PIP2, PMP2, TEE2, VLV2, BRK2, FIL2, WRLCM.
OUT3D	FTRACE, CLEAR, RDLCM, ERROR, VSL2, WRLCM, MANAGE, SREBAL, SOLVE,
OUTER	TIM1, FTRACE, IOVLY, CLEAR, OUT1D, SOLVE, BKSUB, ERROR, SECOND, OUT3D, TSTP, EOPLY, TIM2.
PIP1	FTRACE, SAVBD, MIXVEL, PRP1D, TRPSET, SETBD
PIP2	FTRACE, INNER,
PIP3	FTRACE, SAVBD, PST1D, FLUX, MELK, LEV1D, EV1D, SETBD, CNSTB,
TEE1	FTRACE, LININT, ERROR, SAVBD, TEEX, MIXVEL, PRP1D, SPD, TRPSET, SETBD,
TEE2	FTRACE, ETEE, SPDI, SPDR, INNER,
TEE3	FTRACE, SAVBD, PST1D, FLUX, MELK, LEV1D, EV1D, SETBD, CNSTB,
TF1D	FTRACE, TIM1, THERMO, TF1E, TF1I, FF1D, TIM2,
TRANS	TIM1, FTRACE, ERROR, SECOND, CLI2, TRPACT, SEDIT, GRFCTL, TSTW, TIMCHK, TIMSTP, NOSUCH, CLOC, TRPSET, PREP, CNTL, CLEAR, OUTER, POST, SAFT, TRIP, TSTP, TIM2.
...	...

En la tabla 2.3 se presenta una lista de las rutinas principales de RAMONA.

Tabla 2.3 Rutinas principales de RAMONA para el cálculo de un transitorio.

...	...
DATAIN	MINMAX NEIGHB RESFIL
DINUT3	FMSMSG FMSEXT
DYN	CPUTID XEDYN MATDYN F1DYN F2DYN TFDYN SUMMARY CPUTID DYNLIST PREDYN
...	...
HPCI	INTF
HYDRO1	THERMO FWTRIP HPCI RCIC WFCTRL SLIPDY
HYDRO2	EVAP RCTRIP PUMP
MAIN	CPUTID OPENFL RAMONA3
NUMINT	CPUTID SHUFL1 PCHFST WSRSTR REGSTR WFCSTR BORON STMLN HYDRO1 TCAN HYDRO2 TCAN PRINT SHUFL2 ACCURAT COURANT FCALC PRINT
PREDYN	CPUTID
RAMONA3	INITDAT RSTRD CRDINP DATAIN PLTSCM PLTLCM OPTION HEADER SIGFIL INPUT INIT2 TSTINP EXCROS CPUTID STATIC RSTWR PETFIL STMLN DYNPUT DYNICS SUMMARY
...	...

## 2. 4 Descripción de PVM

PVM (*Parallel Virtual Machine*, máquina virtual paralela) es una librería de rutinas, de dominio público, para programación paralela mediante paso de mensajes. Las rutinas de PVM comunican procesos (que pueden ejecutarse en el mismo o en diferentes procesadores). Puede incluso que los procesos que se comunican se estén ejecutando en plataformas heterogéneas (diferente modelo de procesador, diferente fabricante, diferente sistema operativo, etc.). En caso de que los procesos residan en el mismo procesador, se comunicarán a través del sistema operativo, si no es así, la comunicación se efectuará a través de la red de interconexión (normalmente una red de ordenadores convencional). Las rutinas de PVM pueden llamarse desde C o desde FORTRAN, existiendo diferencias sintácticas entre ambos tipos de llamadas debidas a la diferente concepción de ambos lenguajes.

La filosofía de trabajo de PVM es de la siguiente forma: En cada uno de las computadoras donde se está ejecutando PVM y por cada uno de los usuarios existe un proceso, denominado "pvmd" que se comunica con todos los procesos PVM de ese usuario que están ejecutándose en esa computadora. Si los procesos se ejecutaran en procesadores diferentes, cada proceso se comunicará con pvmd y los diferentes procesos pvmd, correspondientes a los diferentes procesadores, se comunicarán a través de la red. Cada proceso que funciona bajo PVM posee un número que le caracteriza; ese número, llamado identificador del proceso, puede obtenerse llamando a una librería de PVM. Este identificador de proceso es necesario para que los demás procesos se comuniquen con él, enviando o recibiendo mensajes. Las rutinas de envío y recepción de mensajes emplean los identificadores para seleccionar el proceso de destino u origen.

Las siguientes son algunas de las rutinas básicas de PVM:

**pvm\_mytid()** Devuelve el identificador del proceso en curso.

**pvm\_parent()** Devuelve el identificador del proceso que arrancó el proceso en curso.

**pvm\_exit()** Informa al proceso pvmd de que el proceso en curso va a terminar.

**pvm\_kill()** Termina la ejecución del proceso PVM cuyo identificador se especifica.

**pvm\_addhosts()** Añade computadoras a la máquina paralela virtual. Los nombres de las computadoras a añadir se indican en un vector de cadena de texto.

**pvm\_spawn()** Arranca copias de un proceso y devuelve sus identificadores en un vector.

En términos generales, las computadoras paralelas hacen posible resolver problemas de creciente complejidad y obtener resultados con mayor velocidad. En teoría el paralelismo es simple: aplicar varias computadoras a un único problema.

En el acoplamiento de los códigos se eligió utilizar PVM por sus características:

- Promete cumplir los requerimientos que necesita la computación distribuida del futuro, permitiendo escribir programas que utilicen una serie de recursos capaces de operar independientemente y que son coordinados para obtener un resultado global que depende de los cálculos realizados en todos ellos.
- Fácil instalación y una interfaz de programación simple y completa.
- Es un software de dominio público con creciente aceptación y uso.
- Se adapta a diversas arquitecturas.
- Permite combinaciones de redes locales con las de área extendida.
- Cada aplicación "decide" donde y cuando sus componentes son ejecutados y determina su propio control y dependencia.
- Se pueden programar diferentes componentes en diferentes lenguajes.
- Permite aprovechar el hardware existente, asignando cada tarea a la arquitectura más adecuada.

En el apéndice C se proporciona un programa con rutinas de PVM.

## **2. 5 Conclusiones**

Se revisaron los códigos TRAC y RAMONA en su estructura computacional, los métodos numéricos y las rutinas principales. Este esbozo inicial permite proponer la forma en que pueden ser acoplados ambos códigos con las probables rutinas a modificar.

Se encontraron varias diferencias, tanto de estructura modular, como los modelos matemáticos y los métodos numéricos. El principal desafío para el acoplamiento es sincronizar/acoplar los métodos numéricos de ambos códigos. El paso maestro lo llevará la neutrónica de RAMONA; en tanto que la termohidráulica de TRAC, con un criterio de convergencia más restrictivo, reemplazará la termohidráulica de RAMONA.

Basándose en toda esta información se propuso una serie de pruebas preliminares para la comunicación y sincronización de los métodos numéricos de la neutrónica de RAMONA con la termohidráulica de TRAC; los cuales se describen en el capítulo 3.

Capítulo 3:

## *Acoplamiento directo de RAMONA y TRAC*

En este capítulo se describe la metodología para el acoplamiento de TRAC y RAMONA. La configuración resultante del acoplamiento se le denomina: Simulador 3D de reactores tipo BWR (S3D-BWR). Se definen las pruebas preliminares para crear el entorno virtual con PVM y los códigos BE. Se proponen 4 pruebas para acoplar y 3 pruebas para verificar el acoplamiento. Posteriormente se describe el diseño conceptual para modelar una central nucleoelectrónica completa utilizando este esquema de acoplamiento.

### 3.1 Definición de acoplamiento para RAMONA y TRAC

#### 3.1.1 Requerimientos

Para el producto final se establecieron los siguientes tres requisitos:

- R.1 Que el sistema acoplado pueda usarse para centrales nucleoelectricas tipo BWR tradicionales o de diseños avanzados/evolucionados. La propuesta del acoplamiento debe realizarse de tal forma que el código acoplado tenga la versatilidad de acoplarse con otros códigos o modelos mecanísticos para simular partes críticas y/o específicas de las nuevas centrales nucleares.
- R.2 Minimizar las modificaciones a los modelos matemáticos y/o rutinas de cada código. Las modificaciones principales consisten en agregar instrucciones/rutinas a cada uno de los códigos para la transferencia de mensajes.
- R.3 No modificar los métodos numéricos de los códigos; solamente se propondrá un procedimiento para acoplar y sincronizar los métodos numéricos de ambos códigos.

Dentro de las características deseadas para el sistema acoplado se encuentran:

- R.4 Menor incertidumbre con el sistema acoplado respecto al que se obtiene con los códigos individuales.
- R.5 Gama más amplia para modelar transitorios respecto a los transitorios que se pueden simular en forma individual.
- R.6 Razón de tiempo de simulación a tiempo simulado no mayor en el sistema acoplado respecto a las mismas razones de los códigos individuales.
- R.7 La posibilidad de llevar el sistema acoplado a simulaciones en tiempo real.

Basándose en lo anterior, el acoplamiento de RAMONA y TRAC se realizará utilizando:

- **Técnicas de programación distribuida y paralela utilizando PVM.** Se configura el hardware para ejecutarse el software de cada código en una computadora personal (PC). RAMONA se ejecuta en una PC1 con sistema operativo Linux y TRAC se ejecuta en PC2 con sistema operativo Linux.
- **Una red de área local/convenicional (LAN).** Las PCs están conectadas a través de una red de área convencional de 10/100 Mbps. Las condiciones de frontera entre RAMONA y TRAC se transfieren desde la PC1 a la PC2 y viceversa utilizando la red convencional LAN.

### 3.1.2 Metodología

En el acoplamiento se utiliza el modelo 3D neutrónico de RAMONA. TRAC proporciona el modelo 3D termohidráulico y los modelos de transferencia de calor. Se utiliza el paso de integración maestro de RAMONA para el sistema acoplado ya que la neutrónica puede utilizar pasos de integración más amplios.

En RAMONA original, el acoplamiento de la neutrónica con la termohidráulica se realiza de tal forma que: la neutrónica determina un tamaño de paso de integración para avanzar en el tiempo, con este valor las rutinas de la termohidráulica determinan el tamaño de paso que utilizarán para que el punto final de la neutrónica coincida exactamente con la termohidráulica.

Para el código acoplado, TRAC utiliza tamaños de paso de integración variables y para coincidir con la neutrónica de RAMONA se utiliza la interpolación lineal alrededor del punto final de integración de RAMONA. En la figura 3.1, la interpolación en TRAC se realiza alrededor del punto correspondiente a  $t=0.01$  seg., los valores interpolados se envían como condiciones de frontera al modelo neutrónico de RAMONA. El procedimiento se repite y RAMONA determina un nuevo paso de integración para avanzar en el tiempo hasta alcanzar el tiempo de simulación deseado.

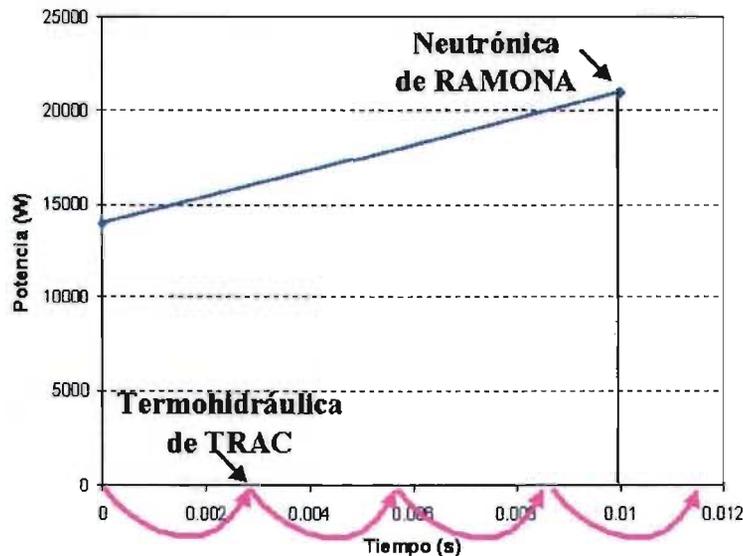


Figura 3.1 Acoplamiento de los métodos numéricos de RAMONA y TRAC.

Finalmente el acoplamiento de RAMONA y TRAC es de la siguiente forma: RAMONA resuelve las ecuaciones de transporte de la neutrónica y obtiene los perfiles de potencia

para cada paso de integración maestro, para cada celda axial de un ensamble y para cada ensamble. Estos perfiles de potencia y los valores predichos de las dos últimas integraciones se envían como condiciones de frontera para los canales hidráulicos de TRAC. TRAC recibe los perfiles de potencia de RAMONA y utiliza estos valores para resolver las ecuaciones de conservación de la termohidráulica. La solución de estas ecuaciones determina los perfiles para la temperatura promedio del combustible, la fracción de vacíos y las propiedades físicas del refrigerante. Una vez determinados todos estos perfiles, para el paso de integración actual, se envían como condiciones de frontera a los canales neutrónicos de RAMONA los cuales actualizan los perfiles de potencia neutrónicos.

### *3.1.3 Pruebas preliminares*

En esta sección se describen las pruebas preliminares de acoplamiento. Estas pruebas tienen por objetivo probar partes aisladas del acoplamiento y determinar los consumos de CPU de los modelos individuales y el posible impacto en el acoplamiento de RAMONA y TRAC.

#### **Objetivo:**

El objetivo principal de estas pruebas es establecer una metodología para acoplar TRAC y RAMONA. Los objetivos específicos son cuatro: (1) determinar/verificar las rutinas y los nombres de las variables que serán modificadas en TRAC y RAMONA. Estas variables representan las condiciones de frontera y son: la potencia inmediata, la potencia de decaimiento, la temperatura del refrigerante y el flujo de masa del refrigerante a la entrada del canal hidráulico, la temperatura de combustible, la fracción de vacíos y la presión en la vasija del reactor, (2) intercambiar condiciones de frontera con los códigos corriendo en PCs diferentes; asegurándose que aún las variables de estado pueden ser controladas desde otros modelos corriendo en otra computadora y desde otro código, (3) verificar que los arreglos COMMON de TRAC y RAMONA pueden ser modificados sin introducir errores en la ejecución del código y (4) obtener el tiempo requerido en CPU para modelar varios ensambles de combustible con el componente CHAN de TRAC y determinar si es necesario un modelo termohidráulico más rápido.

#### **Metodología:**

Se implementan rutinas de comunicación en TRAC y RAMONA utilizando PVM; cada código se ejecuta en una PC con sistema operativo Linux Mandrake 7.1. Se modifican las variables en cada código para perturbar las condiciones de frontera. Las variables se monitorean/grafican para su posterior análisis.

Las características del acoplamiento, sistema operativo y las PC's utilizadas en esta prueba se describen en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Configuración del entorno virtual.

Plataforma:	2 PCs (PIII 550 MHz y PII 400 MHz)
Sistema operativo:	Linux Mandrake 7.1
Programas fuentes:	TRAC versión 2000.1 de PSU* RAMONA-3B PVM 3.4 para Linux y Windows
Directorio:	/home/trac/bf1/source/pvm01/trac_linux

\*Penn State University

#### Procedimiento:

Con TRAC se simula un transitorio para un canal hidráulico hasta un tiempo menor de un segundo. Con RAMONA se simula un transitorio para  $\frac{1}{4}$  del núcleo para un tiempo menor de un segundo. El proceso se repite para otras variables que representan condiciones de frontera. Una vez determinadas las variables que representan las condiciones de frontera en ambos códigos, se procede a transferir estas variables desde RAMONA a TRAC. Se realizaron pruebas de comunicación: desde RAMONA se transfiere una función de presión constante de  $7.0E+06$  Pa hacia el modelo termohidráulico de TRAC. La presión se transfiere a los niveles de la vasija del reactor (componente VESSEL de TRAC).

Para determinar el tiempo de CPU requerido para modelar ensambles de combustible, se simula un transitorio, durante 60 segundos, con el componente CHAN de TRAC. Se mide el tiempo de CPU requerido para cada uno de los siguientes casos: 1, 2, 3, 4, 6, 8 y 10 canales hidráulicos modelados.

En forma adicional a esta prueba, se logró agregar una interfaz con MATLAB a la configuración del código acoplado. Una de las funciones de la interfaz es monitorear en forma gráfica (2D y 3D) las variables más importantes. Las características de esta interfaz se describen con más detalle en el Apéndice C.

#### Resultados:

Se modelaron varios casos para determinar las rutinas de RAMONA y TRAC que serán modificadas para acoplar los modelos neutrónico y termohidráulico de estos códigos. Se logró sincronizar dos computadoras en un entorno virtual mediante PVM. En la primera computadora se tiene el modelo neutrónico de RAMONA y en la segunda el modelo termohidráulico de TRAC. Dentro de este esquema se realizaron las primeras pruebas preliminares de transferencia de paquetes/variables entre los códigos. En la tabla 3.2 se muestra las variables que representan las condiciones de frontera entre RAMONA y TRAC.

Tabla 3.2 Condiciones de frontera entre RAMONA y TRAC.

Computadora	PC1	PC2	PC3
<b>Función</b>	Maestro/Neutrónica	RPV3D	TH3D
<b>Código</b>	RAMONA	TRAC	TRAC
<b>Entradas</b>	ALFA y TF	RPOWL y PDHL	RPOWL y PDHL
<b>Salidas</b>	TIME, FIJ007 y QDECAY	TL, WF y P	ALPHA y TFAV
Tiempo de la neutrónica (TIME) Potencia inmediata (FIJ007) Potencia de decaimiento (QDECAY) Fracción de vacíos (ALFA) Temperatura de combustible (TF) Temperatura del refrigerante (TL) Presión (P) Flujo másico del refrigerante (WF)		Tiempo de la termohidráulica (TIME1) Potencia inmediata (RPOWL) Potencia de decaimiento (PDHL) Fracción de vacíos (ALPHA) Temperatura de combustible (TFAV) Temperatura del refrigerante (TL) Presión (P) Flujo másico del refrigerante (WF)	
Nota: El nombre dentro del paréntesis indica la variable en las rutinas de RAMONA.		Nota: El nombre dentro del paréntesis indica la variable en las rutinas de TRAC.	

En la tabla 3.3 y figura 3.2 se muestran los resultados obtenidos para modelar varios ensambles de combustible.

Tabla 3.3 Tiempo requerido de CPU para simular ensambles de combustible con TRAC\*.

Casos modelados:	Tiempo de CPU requerido (s):
Simulación de 1 ensamble	400.5
Simulación de 2 ensambles	936.5
Simulación de 3 ensambles	1524.0
Simulación de 4 ensambles	1923.0
Simulación de 6 ensambles	2730.0
Simulación de 8 ensambles	3680.0
Simulación de 10 ensambles	4785.0

\* En la computadora Pentium II a 400 MHz.

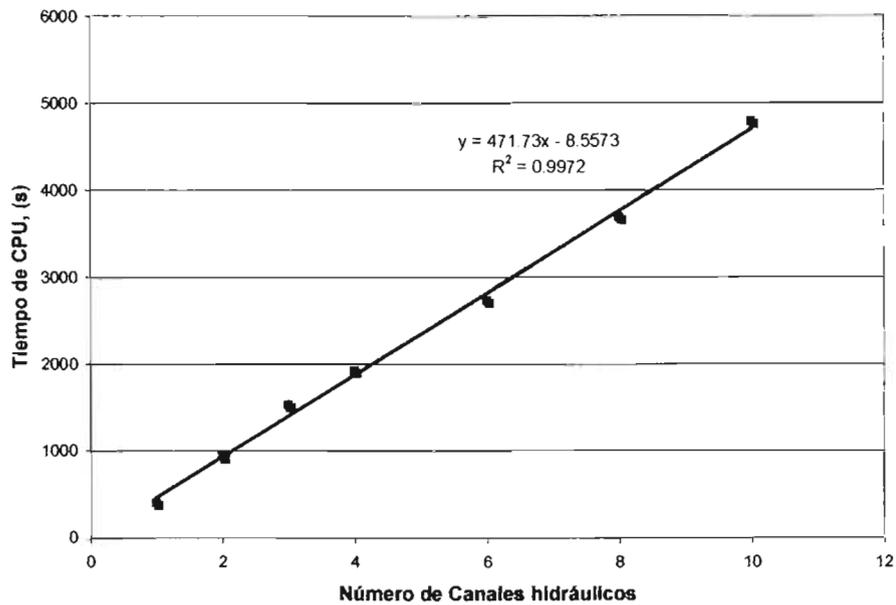


Figura 3.2 Tiempo requerido para simular ensambles de combustible con TRAC.

#### Conclusiones:

Se determinaron las rutinas y variables que representan las condiciones de frontera entre TRAC y RAMONA. Se realizaron pruebas preliminares de transferencia de mensajes desde RAMONA a TRAC con éxito. La idea fundamental en estas pruebas fue asegurarse que aún las variables de estado pueden ser controladas desde otros modelos corriendo en otra computadora y con otro código. Esta situación se requerirá para modelar la termohidráulica de los ensambles de combustible.

Se obtuvo que aún para el modelo simplificado de un componente CHAN de TRAC el tiempo de CPU requerido es al menos 6 veces más que el tiempo real y con la PC dedicada sólo a esta tarea. Para modelar  $\frac{1}{4}$  de núcleo con TRAC, el tiempo de CPU requerido es mucho mayor al tiempo real de simulación. El componente CHAN de TRAC es 86.34 veces más lento que tiempo real.

Todos estos resultados permitieron proponer el esquema inicial de acoplamiento entre RAMONA y TRAC.

### 3. 2 Propuesta de acoplamiento

En la figura 3.3 se muestra el esquema propuesto para el acoplamiento directo de RAMONA y TRAC. En este esquema cada PC tiene una función determinada.

En la PC1 se modela con RAMONA la neutrónica para  $\frac{1}{4}$  del núcleo del reactor (N3D). Se mantiene la estructura total del código incluyendo la termohidráulica y sólo se agregan instrucciones para la comunicación con las otras PCs.

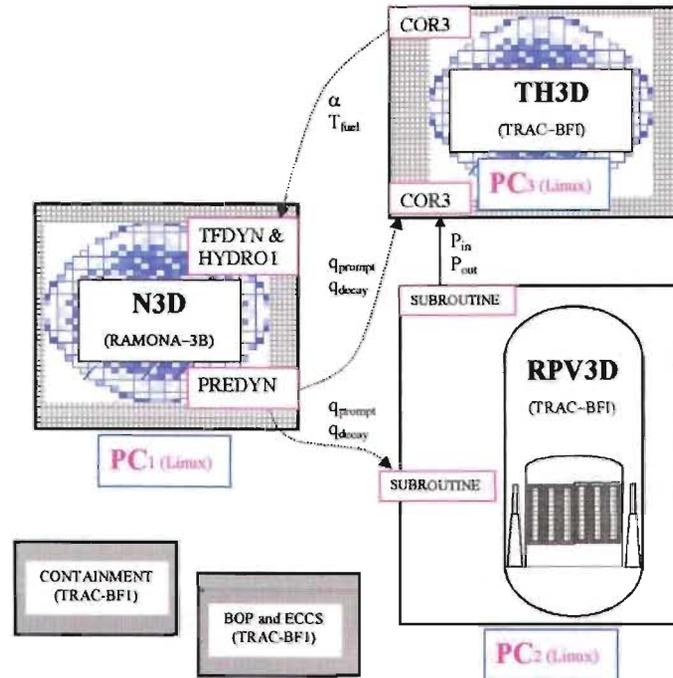


Figura 3.3 Esquema para el acoplamiento directo de TRAC y RAMONA (S3D-BWR.1).

En la PC2 se modela, con TRAC, la vasija del reactor con todos los componentes internos y una representación tradicional del núcleo (RPV3D). Las tasas de generación de energía en los canales hidráulicos se reciben del módulo N3D quien realiza el colapsamiento de acuerdo a un esquema previamente establecido. Los componentes internos de la vasija incluyen: bombas de recirculación, circuito de alimentación del refrigerante, separador y secador de vapor, alimentación de refrigerante y salida de vapor de la vasija, barras de control y tubos guía de las barras de control.

En la PC3 se modela con TRAC la termohidráulica del núcleo del reactor (TH3D). Se propone modelar  $\frac{1}{4}$  del núcleo del reactor (111 canales hidráulicos) con el componente CHAN de TRAC. Para lograr modelar los 111 canales hidráulicos se utilizan técnicas de programación paralela para el componente CHAN de TRAC y simular los canales hidráulicos en varias PCs. Se propone establecer las condiciones de frontera de los

componentes CHAN por medio de BREAKs y FILLs. Las distribuciones de potencia se obtienen del módulo N3D y se generan las fracciones de vacíos, la temperatura promedio del combustible, así como la densidad y temperatura del refrigerante para cada celda axial del canal modelado.

Opcionalmente se propone modelar todos los componentes importantes que forman parte de una central nucleoelectrónica tipo BWR, ABWR, SBWR u otras similares. Los modelos importantes que hacen falta considerar son los siguientes: el modelo de balance de planta (BOP), el modelo de los sistemas de control, el modelo de los sistemas de emergencia y el modelo de la contención. Sin embargo, el acoplamiento (de estos módulos) está fuera del alcance de este trabajo.

En el apéndice B se propone el acoplamiento de un modelo mecánico para los sistemas pasivos de seguridad PCCS (Passive Containment Cooling System) que han sido incorporados en algunos nuevos diseños de las centrales nucleoelectrificadas. El sistema PCCS es un intercambiador de calor en donde se condensa el vapor de agua en presencia de gases no condensables que proviene de la vasija del reactor. En el acoplamiento propuesto se requiere de una PC adicional con SO Linux, el cual se agregará al módulo RPV3D.

La configuración resultante de acoplamiento que se ha descrito con las PCs: 1, 2 y 3 se denominará: S3D-BWR.1 (Simulador 3D de reactores tipo BWR con el modelo termohidráulico de TRAC y la neutróica de RAMONA. El subíndice 1 al final denotará la versión del S3D-BWR).

### 3.3 Diseño de pruebas de acoplamiento

En la tabla 3.4 se describe el diseño de las pruebas para el acoplamiento directo de la neutróica 3D de RAMONA y la termohidráulica 3D de TRAC.

Tabla 3.4 Pruebas para el acoplamiento directo de RAMONA y TRAC (S3D-BWR.1).

Pruebas específicas:	Objetivo:	Resultados:
<p><b>1.1</b> Modelar ¼ del núcleo con RAMONA, con sus respectivos canales hidráulicos y neutróicos. Elegir un canal hidráulico de RAMONA y modelarlo con TRAC. Para el canal seleccionado se establecen los mismos parámetros geométricos, condiciones iniciales y condiciones de frontera.</p>	<p>Determinar las diferencias que existen entre los modelos termohidráulicos de TRAC y RAMONA-3B para el estado transitorio y estacionario.</p>	<p>La descripción, procedimiento y los resultados se presentan en la sección 3.4.1. En la figura 3.4 se describe en forma gráfica esta prueba.</p>

<p><b>1.2</b> Modelar <math>\frac{1}{4}</math> del núcleo con RAMONA, con sus respectivos canales hidráulicos y neutrónicos. Elegir un canal hidráulico de RAMONA y modelarlo con TRAC. A través de PVM se envían dinámicamente las condiciones de frontera entre el modelo termohidráulico de TRAC y el modelo neutrónico de RAMONA.</p>	<p>(1) Completar la prueba 1.1: retroalimentar las condiciones de frontera desde la termohidráulica hacia el modelo de la neutrónica.  (2) Realizar las pruebas en forma dinámica y con PVM.  (3) Determinar las incertidumbres del código acoplado respecto a los códigos individuales.</p>	<p>La descripción, procedimiento y los resultados se presentan en la sección 3.4.2. En las figuras 3.4 y 3.5 se describen en forma gráfica las condiciones de frontera.</p>
<p><b>1.3</b> Prueba para agregar el módulo RPV3D. Se modela la vasija del reactor y sus componentes internos. Desde este módulo se transfiere la temperatura y presión hacia la entrada y salida de los canales hidráulicos (en una versión reducida del TH3D). Este módulo recibe como condición de frontera la potencia inmediata y la potencia de decaimiento del módulo N3D.</p>	<p>Obtener el código acoplado correspondiente al acoplamiento directo de RAMONA y TRAC.</p>	<p>En la figura 3.6 se describe en forma gráfica esta prueba.</p>

En las siguientes figuras se ilustran las condiciones de frontera entre los modelos neutrónicos y termohidráulicos.

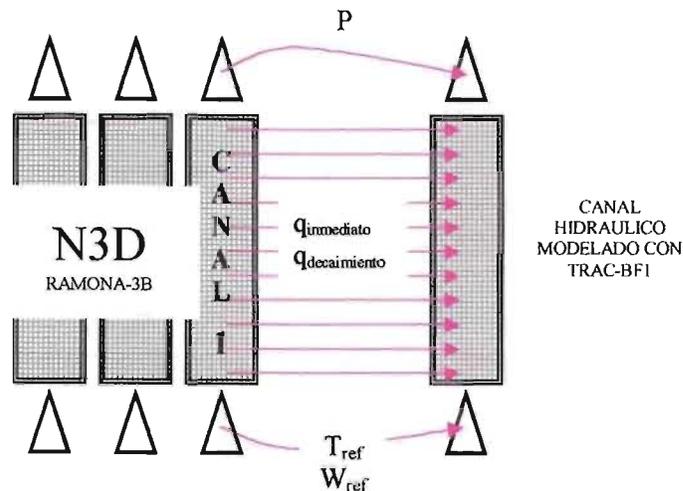


Figura 3.4 Condiciones de frontera desde el módulo N3D hacia el módulo TH3D.

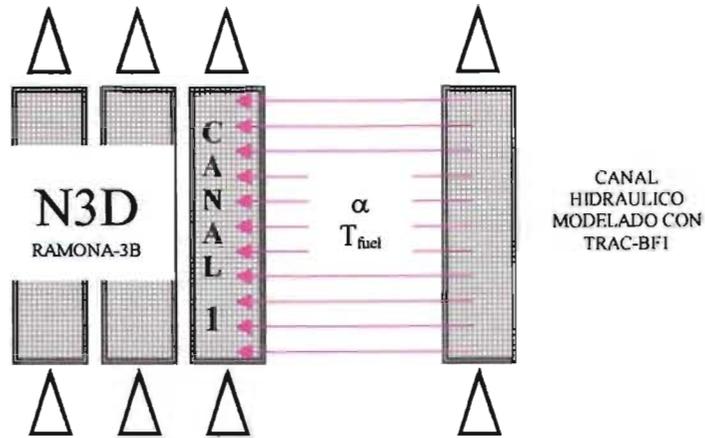


Figura 3.5 Condiciones de frontera desde el módulo TH3D hacia el módulo N3D.

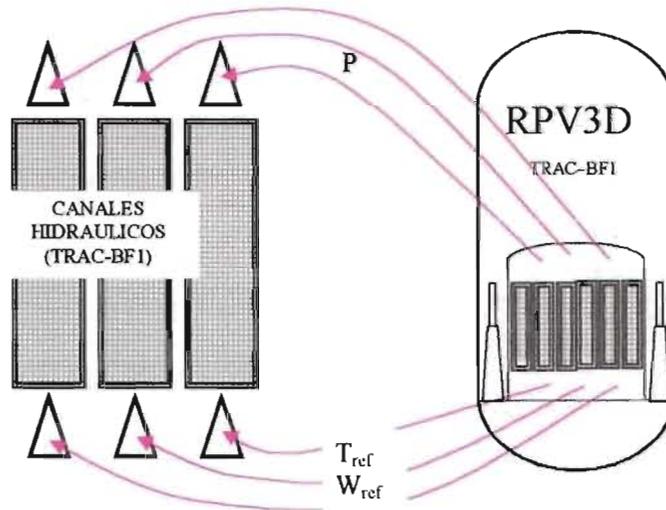


Figura 3.6 Condiciones de frontera entre los módulos TH3D y RPV3D

### 3. 4 Descripción, resultados y análisis de pruebas

En las siguientes secciones se describen en forma más detallada las pruebas de verificación (secciones 3.4.1 y 3.4.2) para el acoplamiento directo de RAMONA y TRAC.

### 3.4.1 Prueba para determinar las diferencias entre los modelos termohidráulicos de TRAC y RAMONA (prueba 1.1)

Descripción:

Esta prueba consta de dos partes: comparar los modelos termohidráulicos de TRAC y RAMONA para los estados (1) estacionario y (2) transitorio.

*(1) Para comparar el estado estacionario se corre el siguiente transitorio:*

Con RAMONA se modela  $\frac{1}{4}$  de núcleo del reactor (fig.3.22) para un transitorio normal hasta los 3.5 segundos. Para el tiempo de 3.5 segundos se hace un movimiento de barras de control durante 0.5 segundos. Se observan perturbaciones del tipo oscilatorio en los perfiles de la potencia desde los 3.5 segundos hasta los 55 segundos de simulación. El caso se modela hasta los 60 segundos (estado estacionario). Se elige un grupo de 3 canales hidráulicos y durante la corrida se monitorea para cada canal: la potencia inmediata y la potencia de decaimiento; la temperatura y el flujo de masa de refrigerante a la entrada del canal; la presión y el flujo de masa a la salida del canal.

Al terminar de simular con RAMONA se especifican las variables monitoreadas como condiciones de frontera a TRAC. La potencia inmediata y la potencia de decaimiento de la rutina PREDYN de RAMONA se transfiere a la rutina COR3 de TRAC. La presión Y(1) de la rutina HYDRO2 de RAMONA se transfiere a la variable P de la rutina BRKX de TRAC. El flujo de masa del líquido WF(K) y la temperatura del refrigerante T(K) de la rutina HYDRO2 de RAMONA son las correspondientes condiciones de frontera a la entrada del canal hidráulico; estas variables se transfieren a la rutina FILL de TRAC. Con estas condiciones de frontera se modela el grupo de tres canales hidráulicos hasta alcanzar el estado estacionario. Al final de la simulación se comparan las variables termohidráulicas de RAMONA y TRAC. Desde la figura 3.7 hasta la figura 3.16 se muestran los resultados gráficos para esta prueba.

*(2) Para comparar el estado transitorio se corre el siguiente caso:*

Con RAMONA se modela  $\frac{1}{4}$  de núcleo del reactor para un transitorio nulo hasta que se obtiene el estado estacionario, en aproximadamente 20 segundos. Para el tiempo de 25 segundos se hace un movimiento de barras de control durante 2 segundos. El caso se deja correr hasta los 32 segundos. El procedimiento, para monitorear las variables en RAMONA y especificar estos valores como condiciones de frontera en TRAC, es igual al caso estacionario.

Al final de la simulación se comparan las variables termohidráulicas de RAMONA y TRAC desde el tiempo de 25 segundos hasta el tiempo simulado de 32 segundos (durante este intervalo ocurre el transitorio: perturbación en la potencia debido al movimiento de barras). En las figuras 3.17 hasta 3.20 se muestran los resultados gráficos para esta prueba.

## Resultados:

(1) *Para el estado estacionario:* En la figura 3.7 se muestra la potencia inmediata obtenida con RAMONA correspondiente al canal 1. En la parte izquierda de esta figura se observan varias curvas, 25 en total, que corresponden a las celdas axiales del canal. En la parte derecha se muestra el comportamiento tridimensional de la potencia inmediata como función de las celdas axiales del canal y del tiempo. Se observa una respuesta rápida en la potencia inmediata debido al movimiento de barras de control (inicia en  $t=3.5$  segundos durante un periodo de 0.5 segundos); la potencia inmediata permanece oscilando hasta  $t=30$  segundos.

Esta variable se envía como condición de frontera desde RAMONA hacia TRAC; en donde se interpola en el tiempo para hacer coincidir con el paso de integración de TRAC. En la figura 3.8 se compara la potencia inmediata obtenida con RAMONA e interpolada en TRAC. Ya que la potencia representa una condición de frontera, los valores utilizados en TRAC y RAMONA son prácticamente iguales para cada una de las celdas axiales y por sencillez sólo se grafican/comparan las celdas axiales 1 y 25. Para facilitar la comparación en la figura 3.8, los perfiles obtenidos con RAMONA no se grafican en el intervalo de tiempo de 8 a 50 segundos.

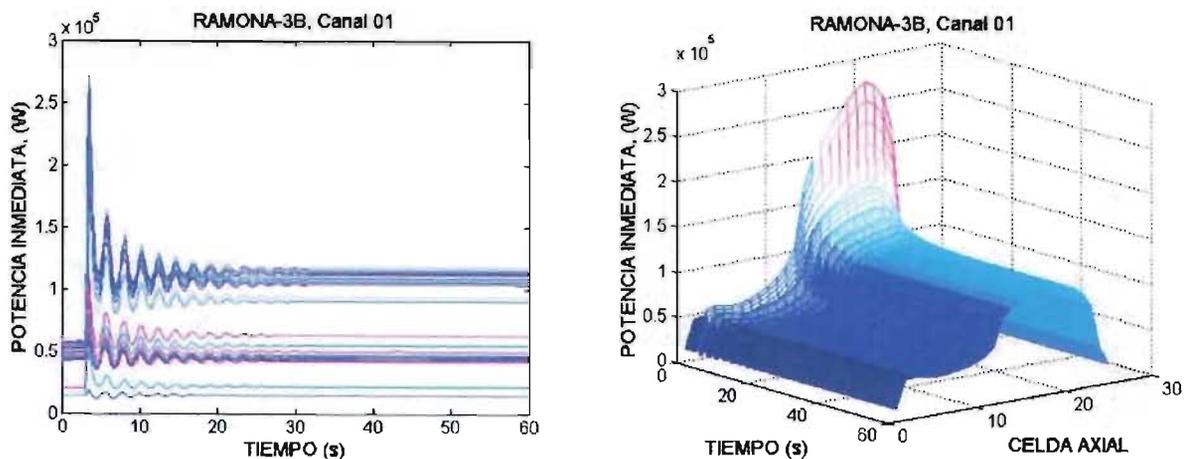


Figura 3.7 Perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA.

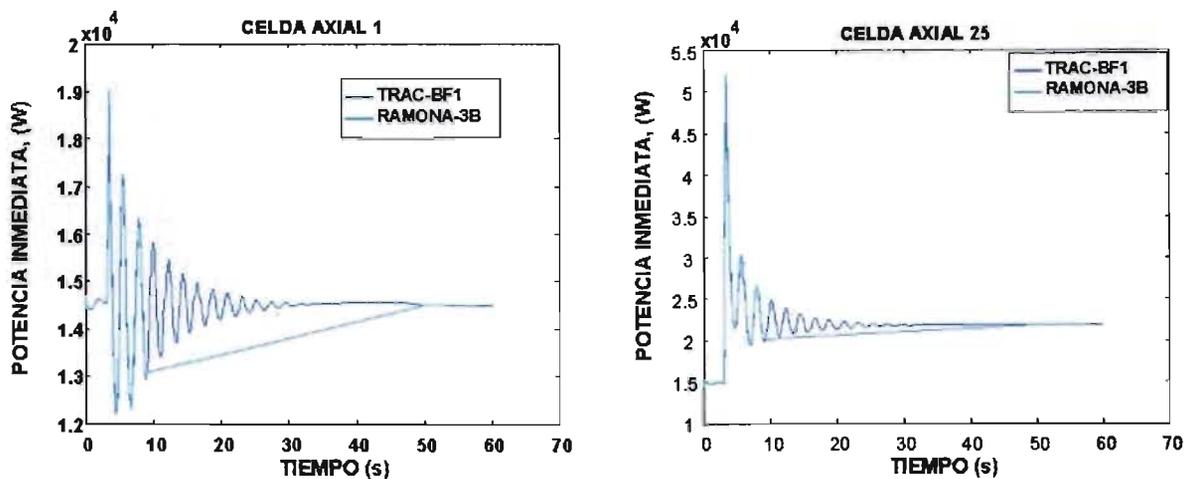


Figura 3.8 Evolución de los perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA e interpolados en TRAC para las celdas 1 y 25.

En la figura 3.9 se muestra la potencia de decaimiento obtenida con RAMONA correspondiente al canal 1. En la parte izquierda de esta figura se observan varias curvas, 25 en total, que corresponden a las celdas axiales del canal. Se observa una respuesta rápida en los perfiles de la potencia inmediata al movimiento de barras de control (inicia en  $t=3.5$  segundos durante un periodo de 0.5 segundos); la potencia inmediata permanece oscilando hasta  $t=30$  segundos.

Esta variable se envía como condición de frontera desde RAMONA hacia TRAC; en donde se interpola en el tiempo para hacer coincidir con el paso de integración de TRAC. En la figura 3.10 se compara la potencia de decaimiento obtenida con RAMONA e interpolada en TRAC.

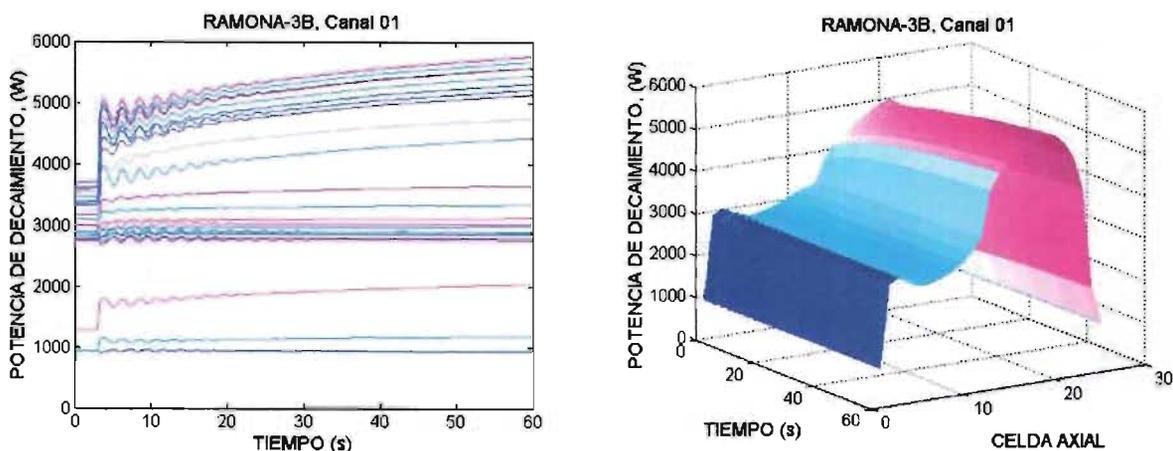


Figura 3.9 Perfiles de la potencia de decaimiento obtenidos con RAMONA.

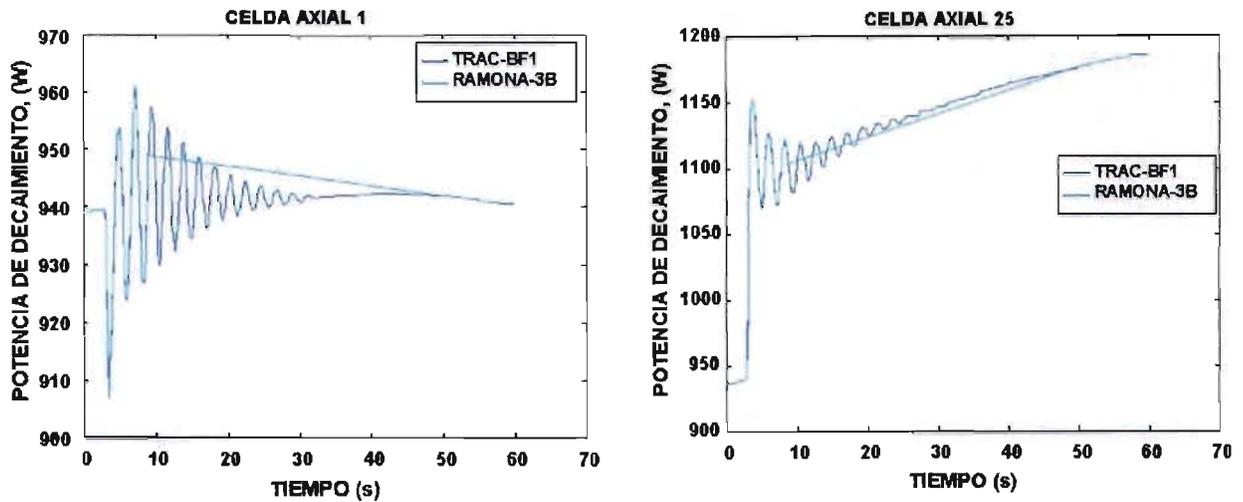


Figura 3.10 Evolución de los perfiles de la potencia de decaimiento obtenidos con RAMONA e interpolados en TRAC para las celdas 1 y 25.

En la figura 3.11 se muestra la presión de la vasija obtenida con RAMONA. Se observa que esta variable no se perturba por el transitorio de movimiento de barras. Esta variable se envía como condición de frontera desde RAMONA hacia TRAC. En la figura 3.12 se compara la presión de la vasija obtenida con RAMONA y la utilizada en TRAC. Para el caso de TRAC, los perfiles muestran un pequeño retraso a la respuesta del movimiento de barras de control; sin embargo la perturbación es pequeña. Para el caso de RAMONA, no existen perturbaciones en la presión; estos perfiles son constantes para todo el tiempo de simulación y para todas las celdas axiales del canal hidráulico. No existe comparación de esta variable, ya que ésta es una condición de frontera. Puede observarse en estas gráficas que la presión no pudo especificarse exactamente igual en los modelos termohidráulicos de RAMONA y TRAC; existe una diferencia máxima de 1.4% y corresponde a la parte inferior del canal hidráulico.

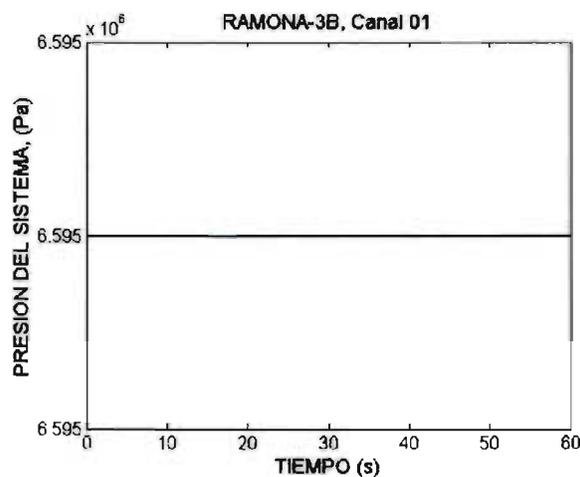


Figura 3.11 Presión del sistema obtenido con RAMONA.

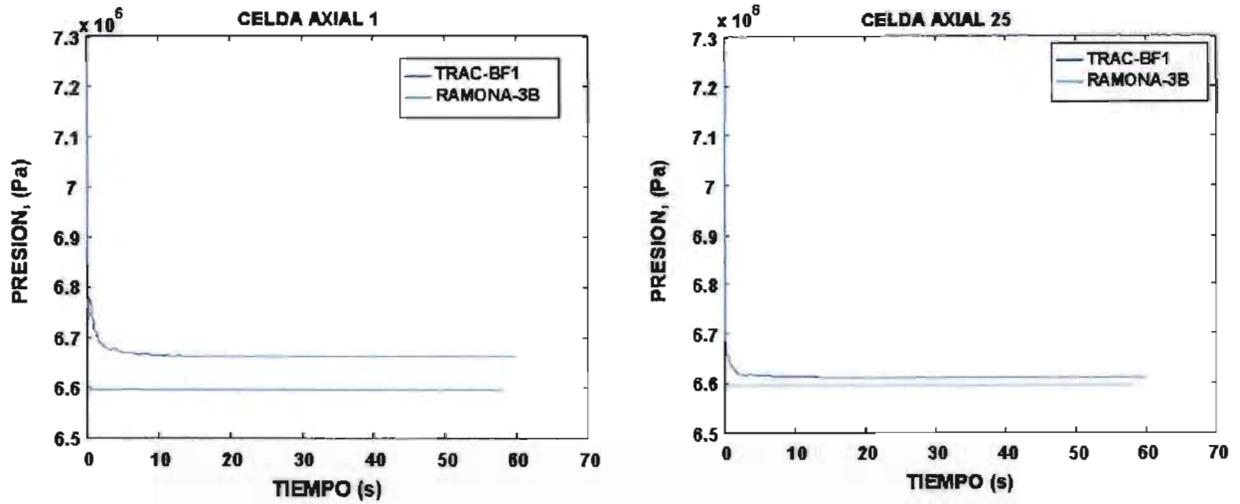


Figura 3.12 Comparación de la presión obtenidos con RAMONA y TRAC para las celdas 1 y 25.

En la figura 3.13 se muestra la temperatura de líquido obtenida con RAMONA. Se observan pequeñas oscilaciones durante el transitorio de movimiento de barras.

En la figura 3.14 se compara la temperatura de líquido obtenida con RAMONA y TRAC. Por sencillez sólo se comparan las celdas axiales 1 y 25 del canal hidráulico. Para el caso de TRAC, los perfiles para el estado estacionario muestran valores superiores del orden de 0.5% (3 K) respecto a los valores obtenidos con RAMONA.

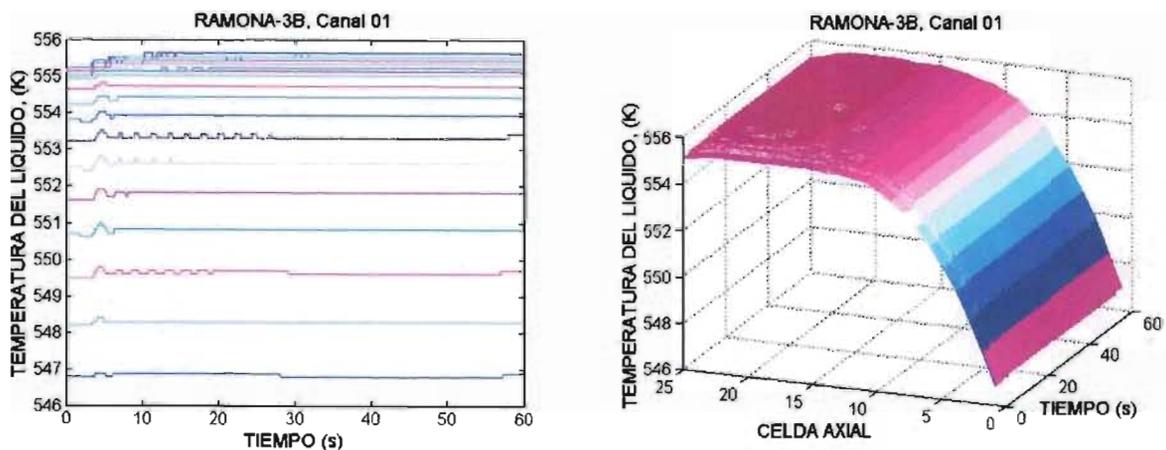


Figura 3.13 Perfiles de la temperatura de líquido obtenidos con RAMONA.

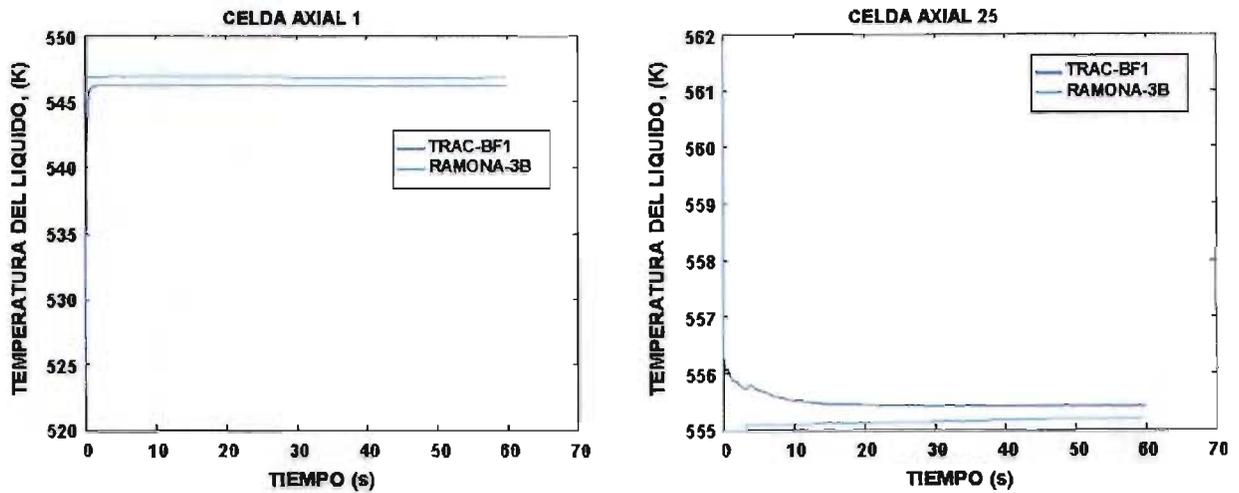


Figura 3.14 Comparación de la temperatura de líquido obtenidos con RAMONA y TRAC para las celdas 1 y 25.

En la figura 3.15 se muestra la fracción de vacíos obtenida con RAMONA. Se observan oscilaciones apreciables durante el transitorio de movimiento de barras.

En la figura 3.16 se compara la fracción de vacíos obtenida con RAMONA y TRAC. Por sencillez sólo se comparan las celdas axiales 3 y 11 del canal hidráulico. Al inicio de la simulación ambos códigos tienen un transitorio nulo con diferencias muy marcadas sin embargo, tienden a valores semejantes en el estado estacionario. Para el caso de TRAC, los perfiles para el estado estacionario muestran valores superiores, del orden de 4% (0.04), respecto a los valores obtenidos con RAMONA. Sin embargo en la parte inferior del canal los valores obtenidos con TRAC son menores (con desviaciones menores a 4%).

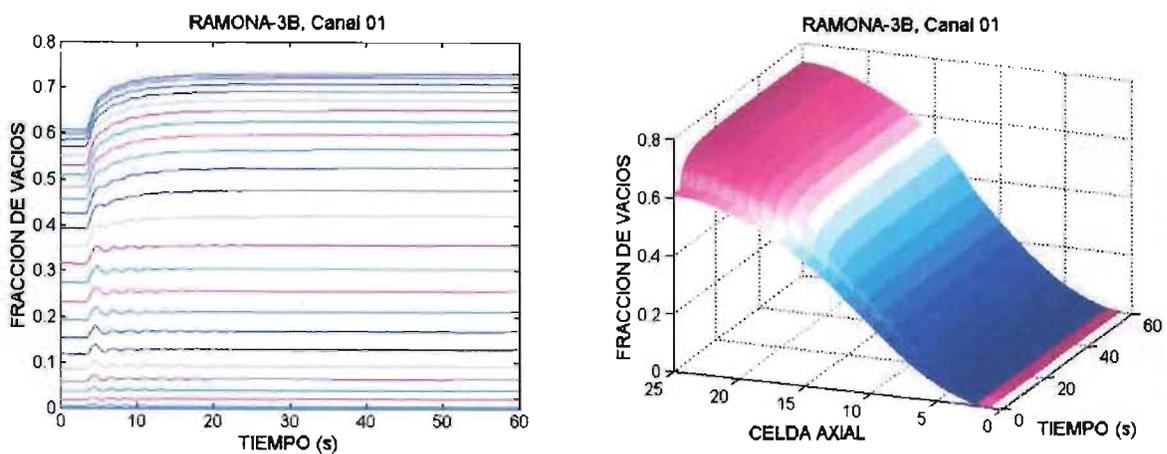


Figura 3.15 Perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA.

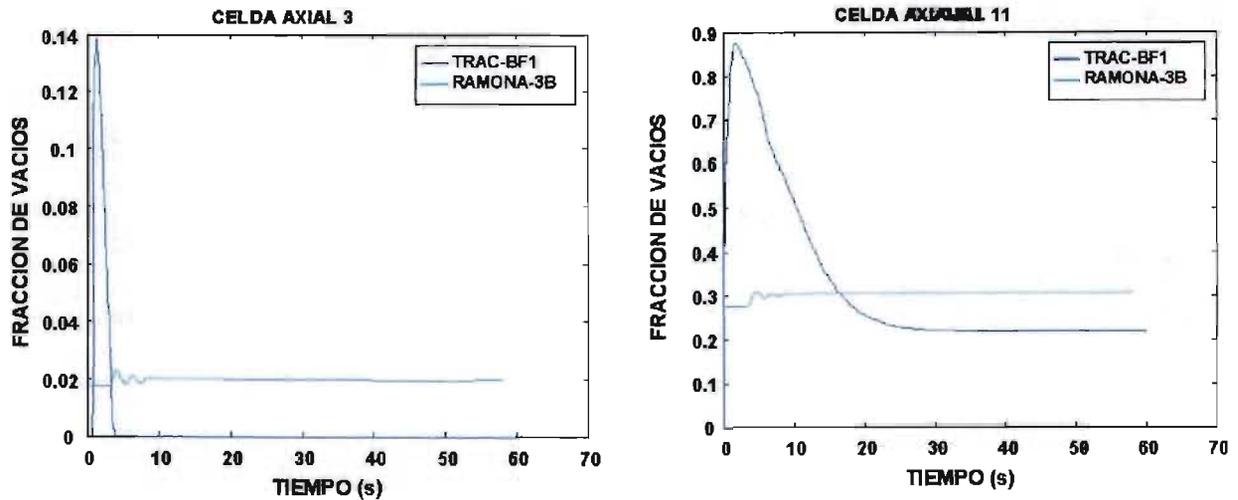


Figura 3.16 Comparación de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA y TRAC para las celdas 3 y 11.

(2) *Para el estado transitorio:* Los perfiles de las variables que se obtuvieron son semejantes al caso anterior excepto que el transitorio inicia a los 25 segundos. Para determinar las diferencias entre los modelos de TRAC y RAMONA se compara la fracción de vacíos (figuras 3.17 a 3.20). Estos perfiles muestran un retraso, de aproximadamente 1 segundo, a la respuesta del movimiento de las barras. Se observan transitorios diferentes para las celdas axiales inferiores del canal hidráulico aunque sus valores numéricos son relativamente pequeños (2% de diferencia máxima). Ocurre lo contrario en las celdas axiales de la parte alta del canal hidráulico: se observan transitorios muy parecidos, pero los valores numéricos son relativamente más grandes (8% de diferencia máxima).

En particular en la figura 3.20 se observa un transitorio en TRAC con ruido numérico a  $t=30$  segundos; el cual se puede atribuir a los valores diferentes en las condiciones de frontera que fueron establecidos para ambos códigos (como la presión). Otra fuente puede ser el tamaño de paso de integración; sin embargo esta opción no es muy probable porque el tamaño de paso de integración que se utilizó en las simulaciones cumple con el criterio de Courant.

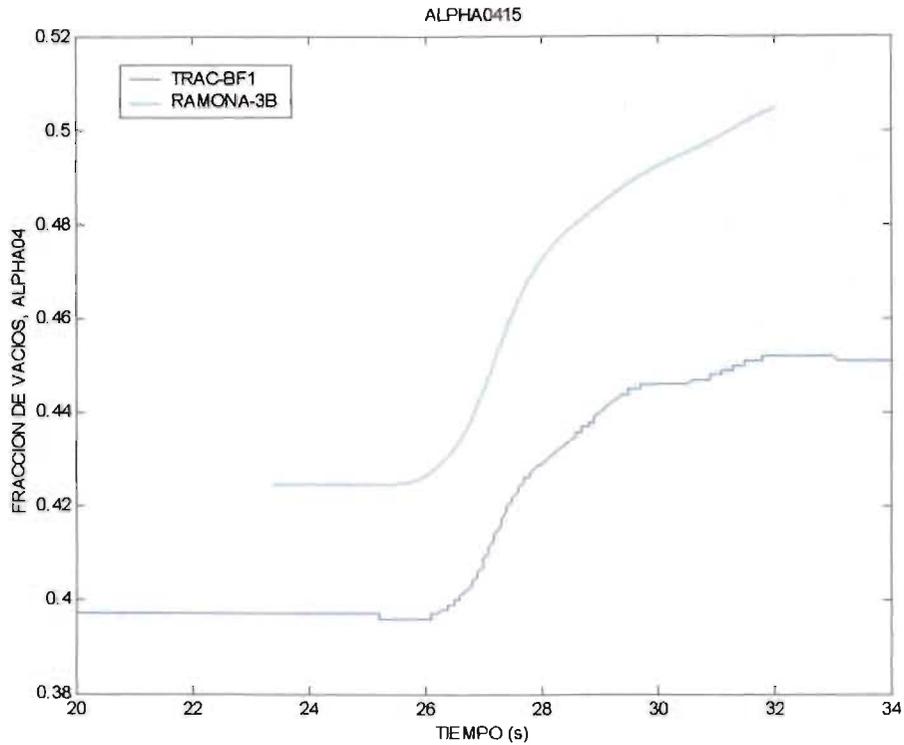


Figura 3.17 Evolución de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con TRAC y RAMONA para la celda axial 15 del canal hidráulico.

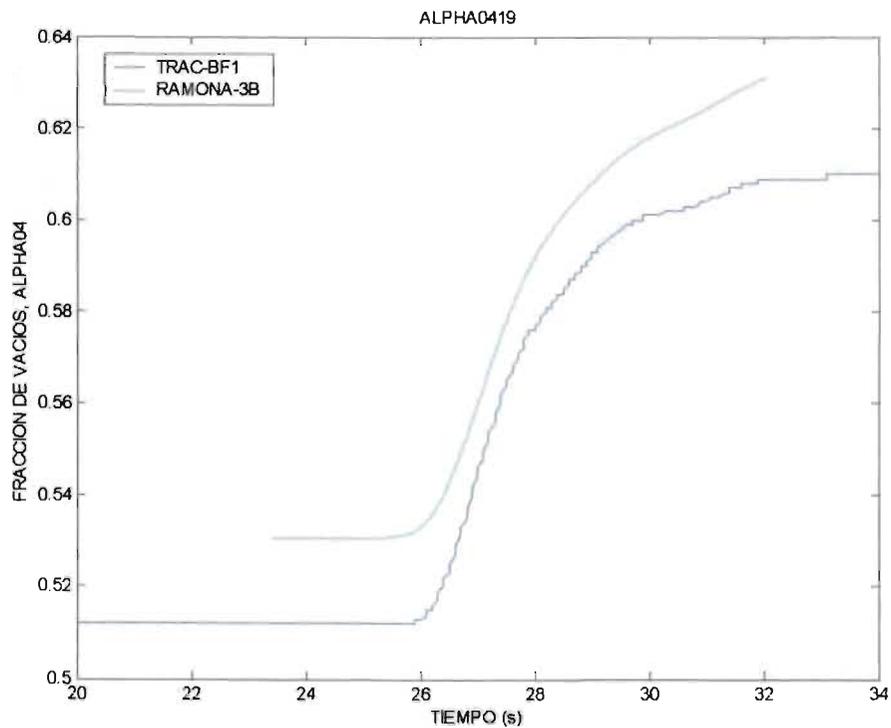


Figura 3.18 Evolución de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con TRAC y RAMONA para la celda axial 19 del canal hidráulico.

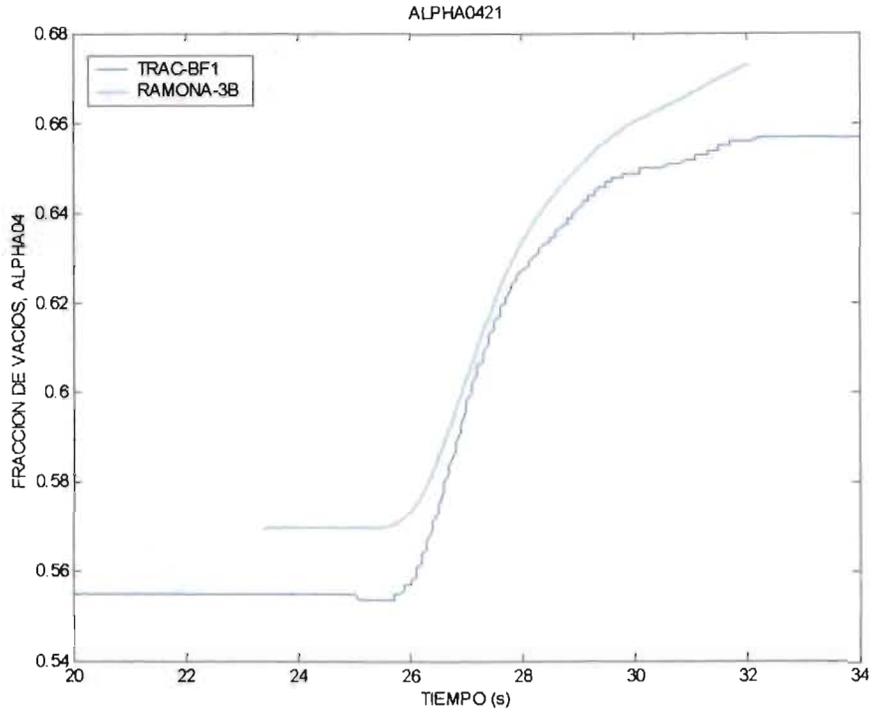


Figura 3.19 Evolución de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con TRAC y RAMONA para la celda axial 21 del canal hidráulico.

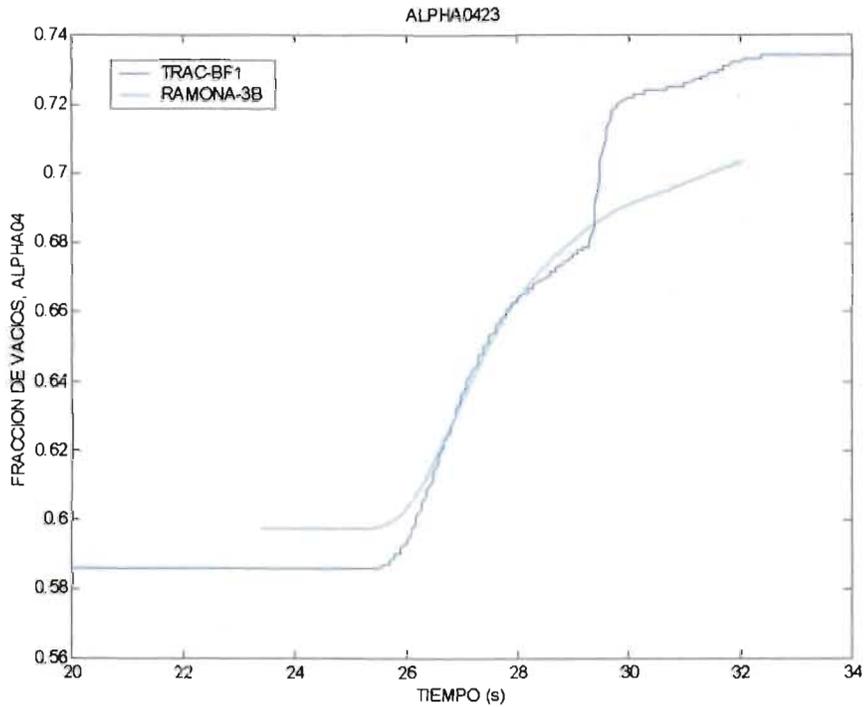


Figura 3.20 Evolución de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con TRAC y RAMONA para la celda axial 23 del canal hidráulico.

Conclusiones:

Se compararon los modelos termohidráulicos de TRAC y RAMONA para el estado estacionario y transitorio. En la tabla 3.5 se muestra un resumen de los valores obtenidos con TRAC y RAMONA para el estado estacionario. Los valores que se muestran corresponden a las celdas axiales 1 y 25 del canal hidráulico.

Tabla 3.5 Comparación del estado estacionario obtenido con el modelo termohidráulico de TRAC y RAMONA.

	Valores de estado estacionario obtenidos con TRAC.	Valores de estado estacionario obtenidos con RAMONA.
Fracción de vacíos	0.00 a 0.77	0.00 a 0.73
Temperatura del refrigerante, (K)	546.27 a 555.42	546.90 a 555.20
Presión, (Pa)	6.659E+06 a 6.609E+06	6.595E+06
Flujo de refrigerante, (kg/s)	5.746	5.609

Las diferencias máximas para el estado estacionario y transitorio son respectivamente de 4 y 8% cuando se perturban los perfiles de la potencia al moverse las barras de control y corresponde a la variable en la fracción de vacíos. Desviaciones menores se observan en los perfiles de la presión y temperatura del refrigerante. Estos resultados muestran que en ambos casos se esperan modificaciones apreciables y/o un comportamiento diferente del módulo N3D al retroalimentar las variables termohidráulicas de TRAC. Esto es porque cualquier variación en los perfiles de la fracción de vacíos afecta/perturba significativamente el modelo neutrónico de RAMONA.

**3.4.2 Prueba para sustituir el modelo termohidráulico de un canal de RAMONA por el modelo termohidráulico de TRAC con PVM (prueba 1.2).**

Descripción:

Esta prueba consta de cuatro partes: (1) Modelar un transitorio de movimiento de barras de control con el código original RAMONA, el cual se usará como referencia, (2) Repetir el transitorio anterior con el módulo CHAN de TRAC, (3) Reemplazar la temperatura de combustible calculada con RAMONA por la del módulo CHAN de TRAC y (4) Reemplazar la fracción de vacíos calculada con RAMONA por la del módulo CHAN de TRAC.

El objetivo de la prueba es reemplazar, en la simulación tridimensional del núcleo, los cálculos termohidráulicos transitorios de un canal de RAMONA por los de un componente CHAN de TRAC utilizando PVM. Analizar en forma detallada el proceso de acoplamiento y

finalmente determinar las diferencias y/o incertidumbre del código acoplado respecto a RAMONA original.

(1) Transitorio de referencia con RAMONA.

Con RAMONA se modela  $\frac{1}{4}$  de núcleo del reactor para un transitorio NULO hasta los 60 segundos. Para  $t = 60$  segundos se modela, durante 0.5 segundos, un movimiento de las siguientes barras de control: 55, 33, 12, 45, 23, 5, 57, 35, 14, 47, 25, 7, 59, 37, 16, 49 y 27 (vea fig. 3.22). Estas barras se encuentran originalmente en el nodo axial 24 (3.65 m) y se extraen a una velocidad constante de 48 nodos/s (7.32 m/s) hasta llegar a la posición CERO (parte inferior del núcleo). Las barras de control restantes se encuentran totalmente extraídas. Este transitorio es un caso irreal que no puede ocurrir en ninguna central. La idea de modelar este transitorio es verificar el comportamiento de los modelos aun en condiciones extremas. El caso se modela hasta los 85 segundos. Se elige el canal hidráulico 1 de RAMONA y se monitorean los perfiles de la fracción de vacíos, la potencia y la temperatura de combustible durante toda la simulación. En la figura 3.21 se muestra los valores de estado estacionario antes de iniciar el transitorio de movimiento de barras. La presión del sistema  $P$  permanece esencialmente constante durante toda la simulación. El transitorio de movimiento de barras perturba apreciablemente la potencia del canal 1 y la potencia total del reactor en forma oscilatoria. Estas oscilaciones de potencia perturban a su vez a las variables termohidráulicas, principalmente la fracción de vacíos, tal como se observa en las siguientes figuras.

Valores de estado estacionario:  
(  $t = 15$  segundos )

$P = 0.6595E+07$  Pa  
 $W_C = 2928$  kg/s  
 $W_s = 313.5$  kg/s  
 $W_{CH} = 6.216$  kg/s  
 $Q_{TOT} = 0.6791E+09$  W

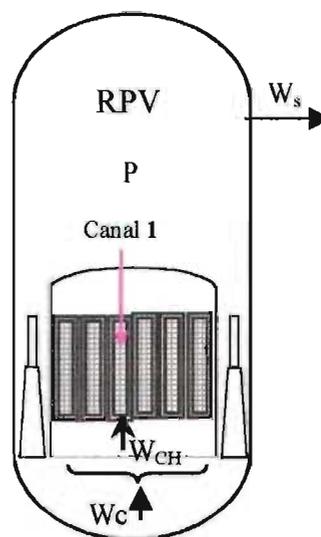


Figura 3.21 Condiciones iniciales para el transitorio de movimiento de barras.

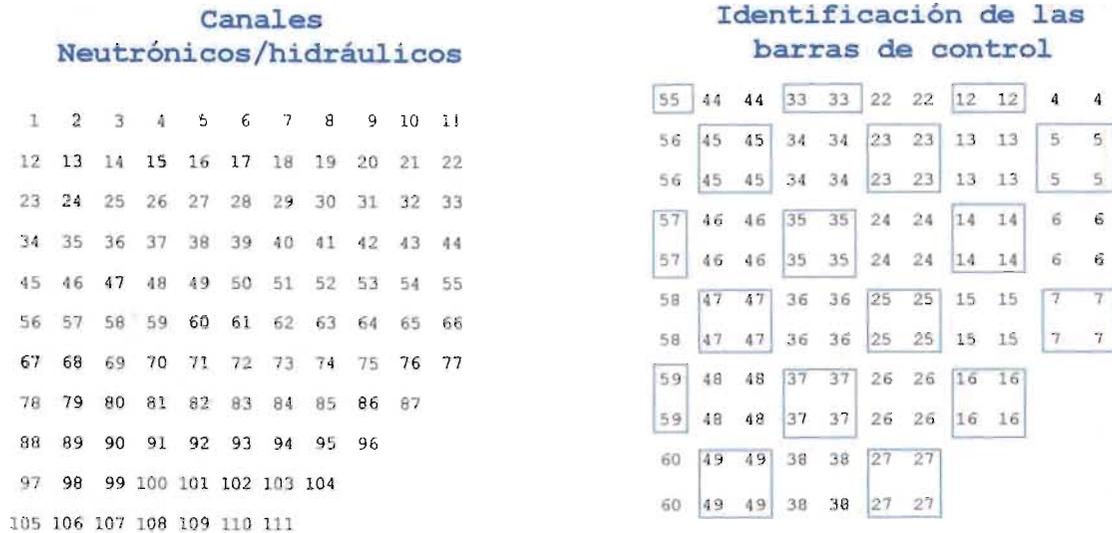


Figura 3.22 Simplificación del núcleo del reactor (444 ensambles) a un cuarto de núcleo (111 ensambles) para modelarse con RAMONA y TRAC.

(2) Simulación del transitorio de referencia con el módulo CHAN de TRAC. Con TRAC se modela el canal hidráulico 1 de RAMONA. Para ello primero se crea un entorno virtual en donde se incluyen dos PCs. En una PC con Linux se instala y corre RAMONA y en la segunda PC con Linux se instala/corre TRAC. Ambos códigos corren en forma sincronizada y en paralelo. El programa maestro es RAMONA e inicia los cálculos resolviendo la neutrónica para el caso de referencia, los perfiles de potencia que se obtienen se envían como condiciones de frontera al módulo CHAN de TRAC. El caso se modela con las siguientes consideraciones adicionales:

- Durante toda la simulación (desde 0 a 85 segundos) las condiciones de frontera: potencia inmediata y de decaimiento, flujo de masa y temperatura de líquido a la entrada del canal y presión a la salida del canal se transfieren dinámicamente desde RAMONA hacia TRAC.
- De 60 a 60.5 segundos se simula el movimiento de barras de control.
- El caso se corre con ambos códigos hasta los 85 segundos.

(3) Reemplazo de la temperatura de combustible calculada con RAMONA por la del módulo CHAN de TRAC. El caso es semejante a la parte 2 con las siguientes modificaciones/consideraciones:

- Durante toda la simulación (desde 0 a 85 segundos) las condiciones de frontera: potencia, flujo de masa a la entrada del canal y presión a la salida del canal se transfieren dinámicamente desde RAMONA hacia TRAC.

- Desde tiempo CERO se retroalimenta la temperatura de combustible desde TRAC hacia RAMONA.
- De 60 a 60.5 segundos se simula el movimiento de barras de control.
- El caso se corre con ambos códigos hasta los 85 segundos.

(4) Reemplazo de la fracción de vacíos calculada con RAMONA por la del módulo CHAN de TRAC. El caso es semejante a la parte 2 con las siguientes modificaciones/consideraciones:

- Durante toda la simulación (desde 0 a 85 segundos) las condiciones de frontera: potencia, flujo de masa a la entrada del canal y presión a la salida del canal se transfieren dinámicamente desde RAMONA hacia TRAC.
- El intervalo de simulación desde 0 a 15 segundos es suficiente para que ambos códigos alcancen el estado estacionario, es decir, se corre un transitorio NULO.
- De 15 a 17 segundos se reemplaza la fracción de vacíos de RAMONA por los perfiles de TRAC. La transición de la fracción de vacíos se realiza en forma lineal, interpolando entre los valores de estado estacionario de RAMONA y TRAC obtenidos en 15 segundos.
- De 17 a 20 segundos se obliga a mantener constante los perfiles de la fracción de vacíos para evitar grandes oscilaciones en la potencia.
- Después de los 20 segundos se liberan los valores constantes de la fracción de vacíos y se utilizan los perfiles calculados dinámicamente con TRAC.
- De 60 a 60.5 segundos se simula el movimiento de barras de control.
- El caso se corre con ambos códigos hasta los 85 segundos.

Análisis de resultados:

Para la parte (1) de esta prueba, desde las figuras 3.23 a 3.26 se presentan los perfiles de la fracción de vacíos, potencia inmediata, temperatura de combustible y temperatura del refrigerante. Todos estos perfiles corresponden al canal hidráulico 1 de RAMONA. En la parte izquierda se muestra la respuesta dinámica correspondiente a las celdas axiales 1, 13 y 25. En la parte derecha se muestra el comportamiento 3D como función de las 25 celdas axiales y el tiempo de simulación.

El transitorio de movimiento de barras afecta significativamente la potencia inmediata, la cual se dispara en forma oscilatoria y tiende a estabilizarse en un valor más alto (190% del valor original). La temperatura de combustible se perturba significativamente y los valores se incrementan en un 19%.

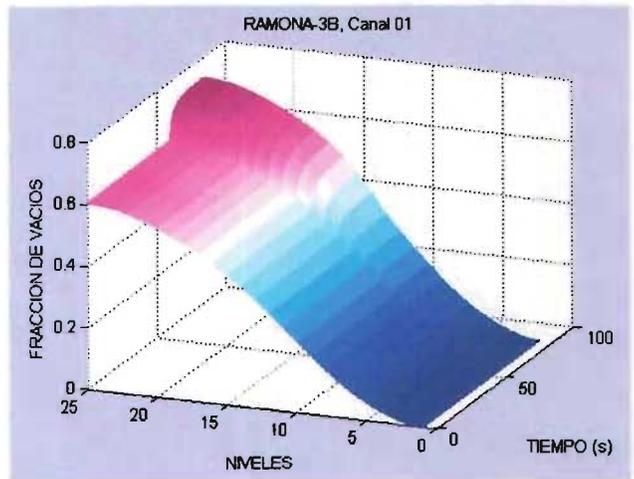
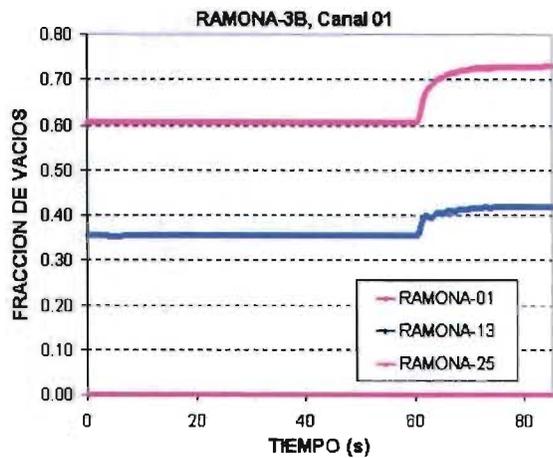


Figura 3.23 Perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA.

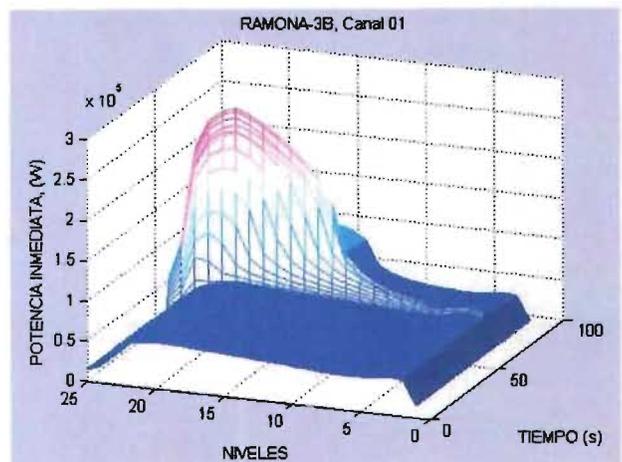
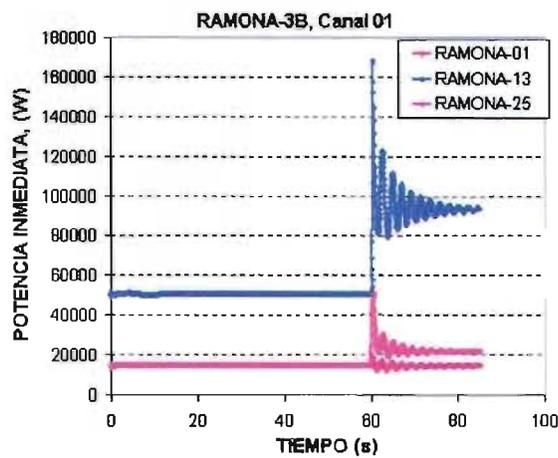


Figura 3.24 Perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA.

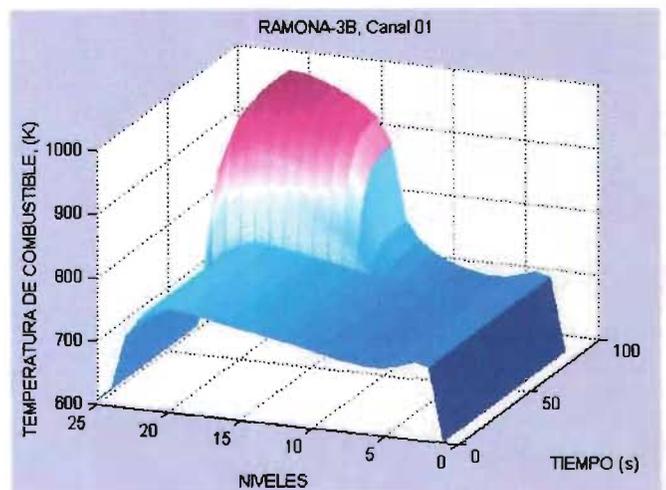
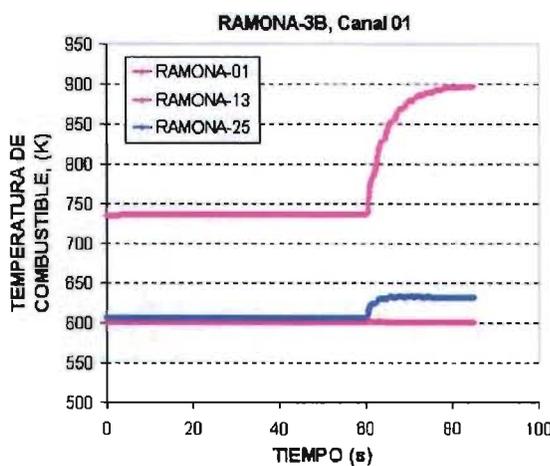


Figura 3.25 Perfiles de la temperatura de combustible obtenidos con RAMONA.

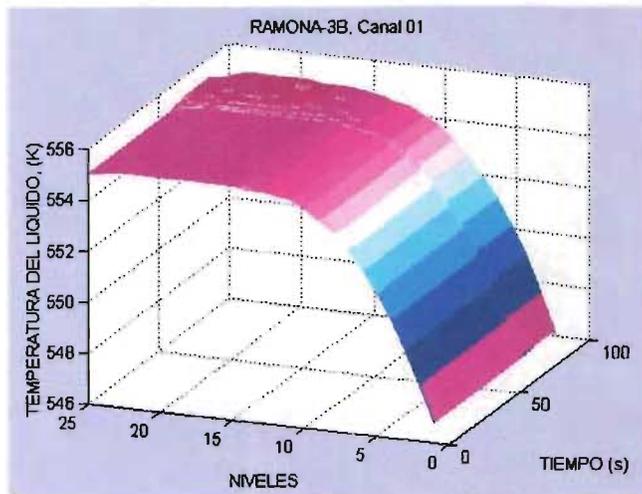
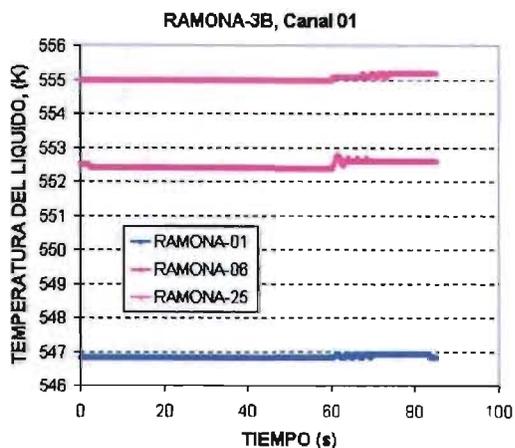


Figura 3.26 Perfiles de la temperatura de refrigerante obtenidos con RAMONA.

El perfil de la fracción de vacíos se incrementa en forma paulatina, alcanzando los valores más altos después de un segundo aproximadamente. La temperatura del líquido refrigerante sólo se perturba en pequeñas oscilaciones con una amplitud de menos de 0.5 K. En la figura 3.27 se presenta la potencia térmica total del reactor, se observa que el valor tiende a estabilizarse en un 5% más alto del valor original.

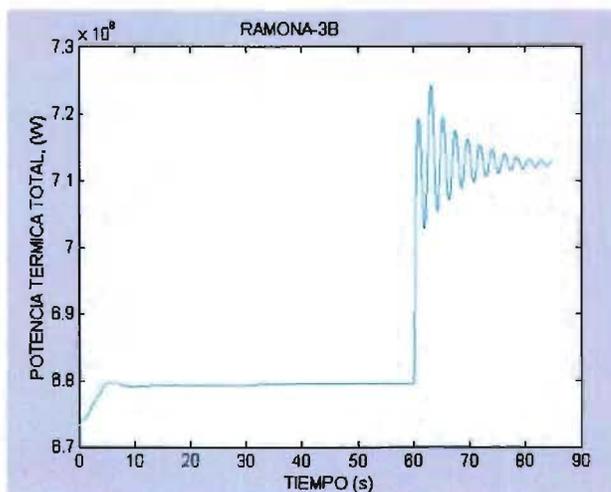


Figura 3.27 Perfil de la potencia térmica total obtenido con RAMONA.

Para la parte (2) se compara la fracción de vacíos, temperatura de combustible y temperatura del refrigerante obtenidos con RAMONA y el módulo CHAN de TRAC (figura 3.28). En estas gráficas se puede comparar el comportamiento de la termohidráulica de TRAC y RAMONA para el transitorio de movimiento de barras. Estos resultados se pueden

utilizar como referencia para predecir el comportamiento al retroalimentar la temperatura de combustible y la fracción de vacíos desde TRAC hacia RAMONA (partes 3 y 4 de la prueba). En estas figuras se observan valores más altos (4%) para los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con TRAC respecto a los valores de RAMONA y corresponde a las celdas axiales superiores. Desviaciones menores se observan en las otras variables. Una de las principales causas, de estas diferencias, es la correlación para evaluar las tasas de evaporación en cada uno de los códigos. En TRAC no se permite generar tasas de evaporación si la temperatura del refrigerante no se encuentra a la temperatura de saturación; en tanto que RAMONA permite tasas de evaporación en la región subenfriada.

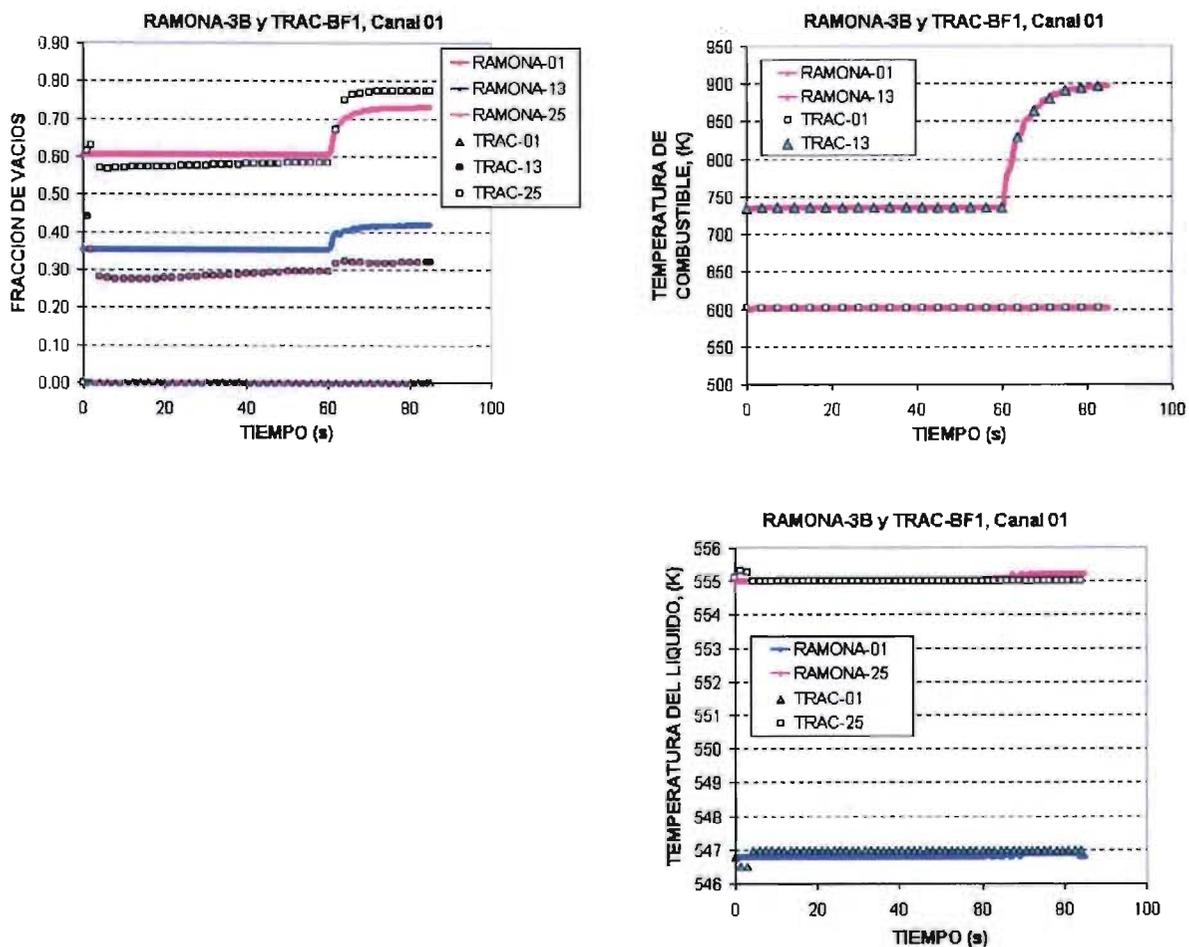


Figura 3.28 Comparación de los perfiles obtenidos con TRAC y RAMONA. (parte 2 de la prueba).

Para la parte (3) se retroalimenta la temperatura de combustible desde TRAC hacia RAMONA. La figura 3.29 presenta los resultados que se obtienen con el código acoplado (S3D-BWR.1). Los efectos del reemplazo de la temperatura de combustible se monitorean en los perfiles de la fracción de vacíos y la potencia inmediata. Se observa en estas figuras que la retroalimentación de la temperatura de combustible no perturba la neutrónica de

RAMONA debido a que los perfiles calculados por ambos códigos son casi idénticos (variaciones máximas de 0.1%). En estas gráficas los perfiles se encuentran traslapados y corresponden a las celdas axiales 1, 13 y 25.

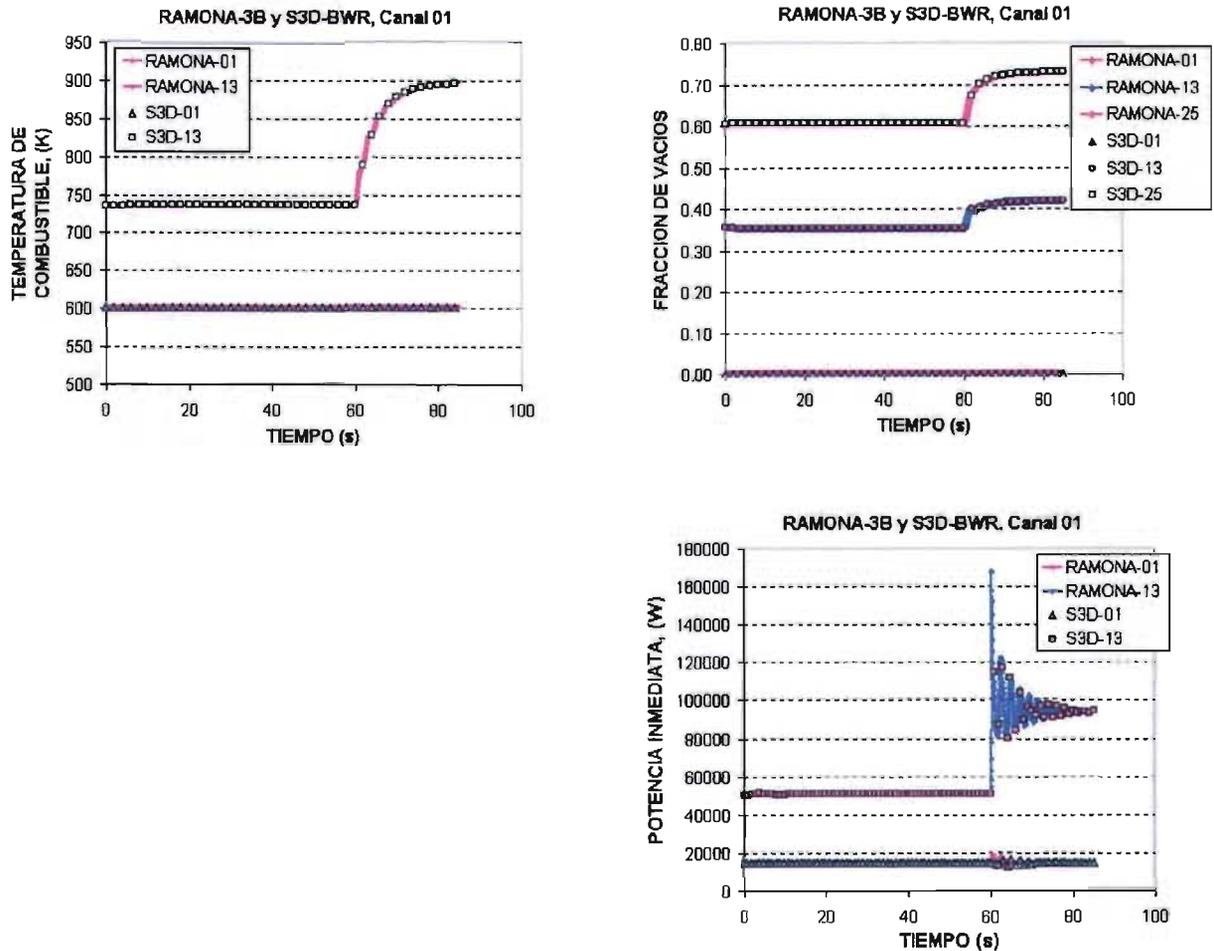


Figura 3.29 Comparación de los perfiles obtenidos con el S3D-BWR.1 y RAMONA. (parte 3 de la prueba)

Para la parte (4) se retroalimenta la fracción de vacíos desde TRAC hacia RAMONA. La figura 3.30 presenta los perfiles obtenidos con el código acoplado (S3D-BWR.1); se observa que para el tiempo de simulación  $t=15$  segundos se inicia la sustitución de los perfiles de la fracción de vacíos en RAMONA y éstos van cambiando linealmente hasta los valores calculados por TRAC en un lapso de 2 segundos. Desde los 17 a 20 segundos se obliga a mantener constantes los valores de estado estacionario de TRAC; este periodo de tiempo es necesario para lograr estabilizar las perturbaciones generadas en la potencia inmediata. Para  $t=20$  segundos se reemplaza completamente la fracción de vacíos de RAMONA por la de TRAC. La respuesta del modelo acoplado se observa a partir de los 20

segundos y tiende a estabilizarse en  $t=40$  segundos. A partir de los 40 segundos el sistema acoplado se ha estabilizado y está listo para modelar transitorios. Como se puede observar en esta figura la respuesta del modelo acoplado, al transitorio de movimiento de barras, es muy similar al código original RAMONA observándose algunas diferencias en el comportamiento y en los valores correspondientes a las celdas inferiores y superiores del canal. Los efectos de reemplazar el perfil de la fracción de vacíos se monitorea en la potencia inmediata y la temperatura de combustible. Se observa en estas figuras que la retroalimentación de la fracción de vacíos perturba significativamente la neutrónica de RAMONA.

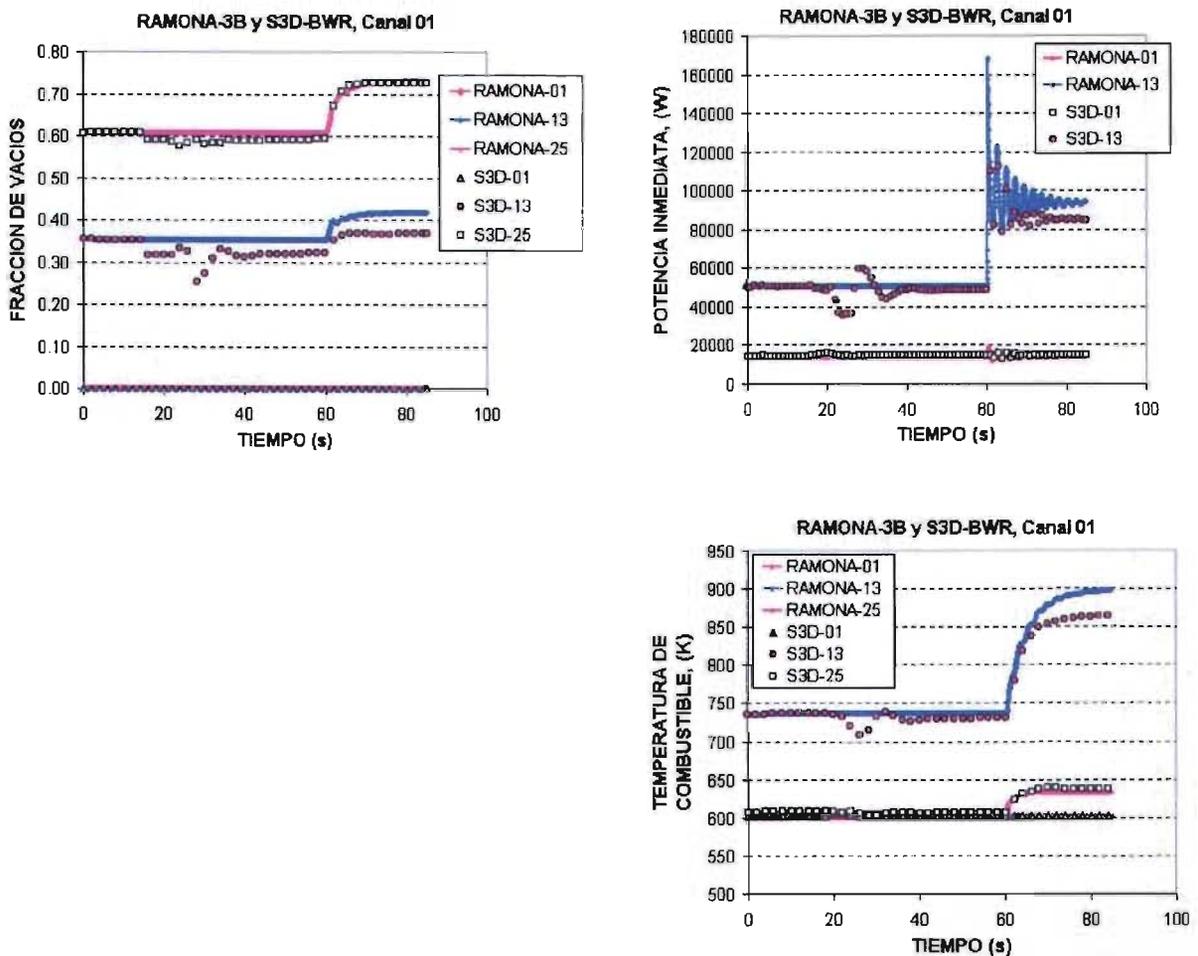


Figura 3.30 Comparación de los perfiles obtenidos con el S3D-BWR.1 y RAMONA.  
(parte 4 de la prueba)

En las siguientes figuras se muestra el efecto en los canales hidráulicos restantes del núcleo al reemplazar el canal hidráulico 1 de RAMONA por el de TRAC. Las

perturbaciones se monitorean en los perfiles de la fracción de vacíos. Se eligieron los canales vecinos 2 y 12 y los canales lejanos 50 y 60.

La figura 3.31 muestra las perturbaciones en los perfiles de la fracción de vacíos correspondientes al canal vecino 2. Se observan pequeñas oscilaciones en los perfiles de ambas figuras para el periodo de 15 a 30 segundos. Para el canal vecino 12 (no se presenta la gráfica) se observan perturbaciones muy semejantes a los mostrados en el canal hidráulico 2.

La figura 3.32 muestra las perturbaciones en los perfiles de la fracción de vacíos correspondientes al canal lejano 50. Las perturbaciones en este canal son aún menores respecto a los canales vecinos. El mismo comportamiento se observa para el canal hidráulico 60 (no se presenta la gráfica).

Esto demuestra que la sustitución del canal hidráulico 1 de RAMONA por el de TRAC, resulta en cambios que afectan al canal sustituido y en menor grado a los ensambles vecinos/lejanos.

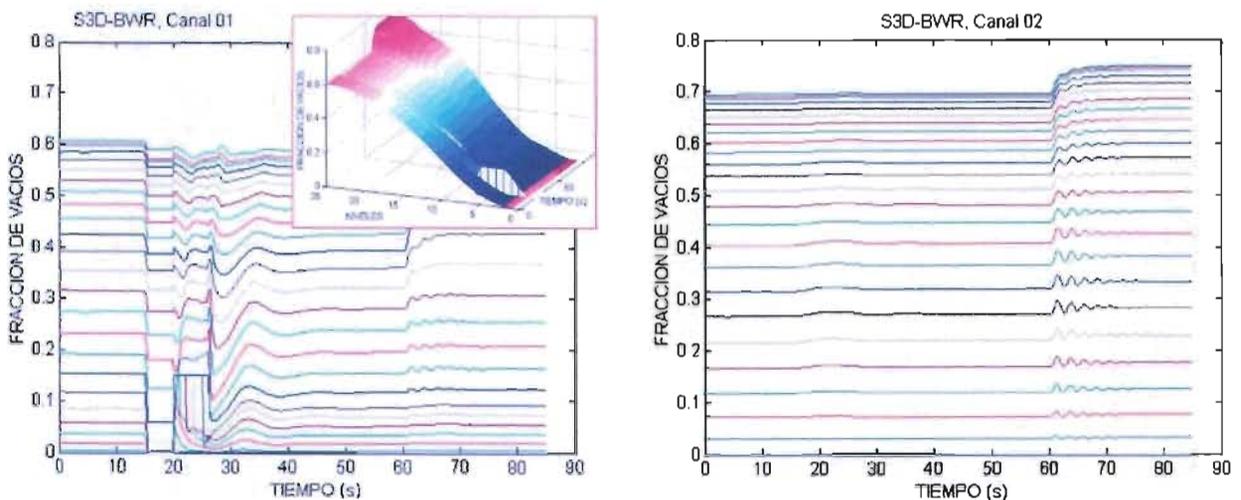


Figura 3.31 Comparación de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con el modelo acoplado. Se compara el canal 1 (a la izquierda) y el canal adyacente 2 (a la derecha).

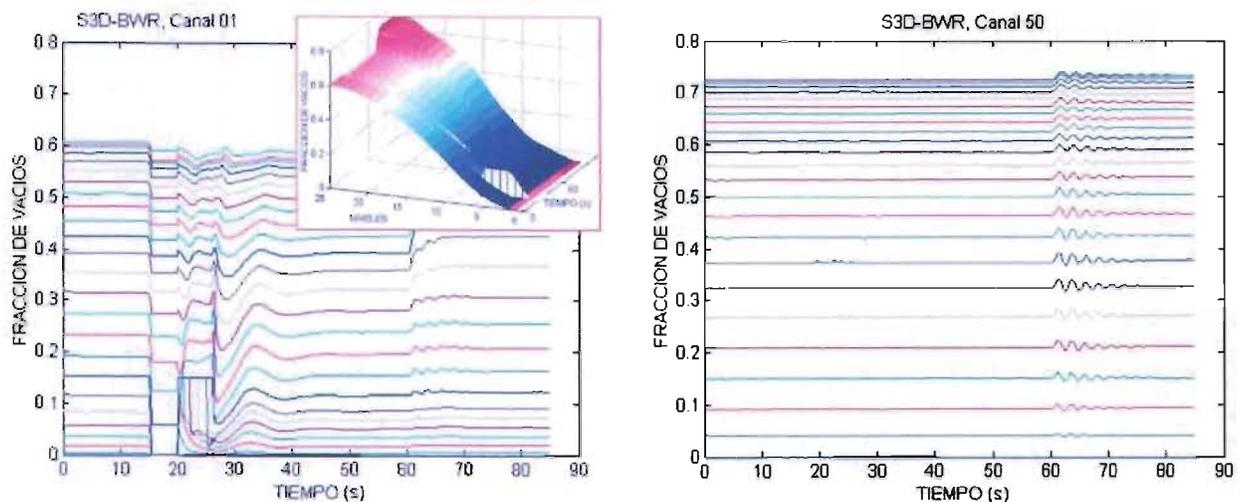


Figura 3.32 Comparación de los perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con el modelo acoplado. Se compara el canal 1 (a la izquierda) y el canal lejano 50 (a la derecha).

**Conclusiones:**

En esta prueba se sustituyó la termohidráulica de un canal de RAMONA por el de un componente CHAN de TRAC utilizando un entorno virtual con PVM.

Se retroalimentó la temperatura de combustible y la fracción de vacíos desde TRAC hacia RAMONA. Se realizaron las pruebas por separado para cada variable y se obtuvo que los perfiles de la temperatura de combustible son muy similares en ambos códigos y no presentan perturbaciones significativas al sustituirlos en RAMONA. Sin embargo, la fracción de vacíos provoca perturbaciones apreciables en la potencia inmediata (y en las otras variables).

Para lograr acoplar ambos códigos se requiere de un tiempo adicional y/o de asentamiento para lograr estabilizar ambos códigos/modelos. Este tiempo es de aproximadamente 20 segundos. En las figuras anteriores este intervalo de tiempo corresponde al tiempo de simulación de 15 a 40 segundos. Después de este periodo el código acoplado se encuentra estable para poder simular transitorios.

Una vez acoplados los códigos/modelos, el tiempo de ejecución del S3D-BWR en el entorno virtual es similar al de RAMONA original.

### 3. 5 Conclusiones del acoplamiento directo

Se obtuvo la versión del S3D-BWR.1 el cual corresponde al acoplamiento directo de RAMONA y TRAC.

Los resultados obtenidos son los esperados; sin embargo no son los adecuados para los propósitos de este trabajo debido a los recursos computacionales que se requieren y al tiempo de simulación muy alejado al tiempo real. Las características más sobresalientes del S3D-BWR.1 son:

- C. 1 Se modela en un entorno virtual con PVM; con este ambiente se encuentra la capacidad para modelar el núcleo en forma paralela y distribuida con otros códigos y/o mejores modelos mecánicos. Esta característica permitió monitorear gráficamente “en tiempo real de cálculo” las simulaciones desde otra PC con MATLAB.
- C. 2 En la generación de vapor de los canales hidráulicos, RAMONA y TRAC tienen modelos diferentes para la región subenfriada y conduce a perfiles axiales de fracción de vacíos diferentes. Consecuentemente los estados estacionarios que alcanzan los códigos acoplados son diferentes a los obtenidos cuando operan independientemente.
- C. 3 Se tiene un espectro de aplicación más amplio al tener acoplado la termohidráulica de dos fluidos de TRAC.
- C. 4 El acoplamiento directo no se puede hacer sustituyendo las variables termohidráulicas de RAMONA por las de TRAC, porque ambos sistemas se vuelven inestables. Para acoplar los códigos se requiere de un tiempo adicional y/o de asentamiento para lograr estabilizar los modelos de ambos códigos. Este tiempo es de aproximadamente 20 segundos. El acoplamiento debe hacerse gradualmente/linealmente para evitar grandes oscilaciones en la potencia.
- C. 5 Una vez acoplados/sincronizados los modelos (códigos), el tiempo de ejecución del S3D- BWR.1 es prácticamente igual al de RAMONA original.
- C. 6 El tiempo de CPU requerido por TRAC, para modelar varios ensambles de combustible, está muy alejado del tiempo real, el cual es prácticamente inalcanzable (para la plataforma de PCs).

Tres características del S3D-BWR.1 (C. 4, C. 5 y C. 6) condujeron a proponer un esquema alternativo de acoplamiento. Para no desproporcionar la sobrecarga de CPU (overhead) y con ello ir en dirección contraria a la obtención de un sistema que logre modelar en tiempo real (o lo más cercano posible), se proponen dos opciones:

- O. 1 Utilizar el módulo PIPE de TRAC para representar un canal hidráulico. Esta opción presenta la dificultad de que cada celda axial debe recibir el calor directo depositado en el combustible y además representar adecuadamente la transferencia de calor en las varillas de combustible lo que a su vez exige un mapeo del PIPE con el fluido del refrigerante, además de la necesidad de un modelo de holgura (gap).
- O. 2 Desarrollar un modelo "Ad-hoc" (adecuado a los propósitos del acoplamiento) usando 4 ecuaciones de conservación, la correlación de Chexal et al., (1991) y mejores modelos para las ecuaciones constitutivas. En la sección 4.2 se describe la propuesta para el modelo del canal hidráulico.

La opción más adecuada parece ser reemplazar el componente CHAN de TRAC por un modelo más rápido. Esta alternativa de acoplamiento se describe en el capítulo 4.

## Capítulo 4:

# *Acoplamiento indirecto de RAMONA y TRAC*

En este capítulo se presenta una propuesta para lograr el acoplamiento de RAMONA y TRAC evitando las inestabilidades numéricas y divergentes que se obtuvieron con el acoplamiento directo. Similarmente se pretende evitar que la sustitución de las variables termohidráulicas de RAMONA por las de TRAC tenga que realizarse con rutinas adicionales. En este nuevo esquema se reemplaza el módulo CHAN de TRAC por un modelo matemático más sencillo. En las primeras secciones se describe este modelo matemático que consiste de 4 ecuaciones de conservación y correlaciones recientes para evaluar los términos fuente en las ecuaciones de conservación. Posteriormente se presentan dos transitorios para verificar esta nueva propuesta de acoplamiento.

## 4.1 Propuesta de acoplamiento indirecto

Los resultados obtenidos para el acoplamiento directo de RAMONA y TRAC mostraron inestabilidad numérica en el proceso de sustitución de las variables termohidráulicas. Por otra parte, con el modelo de dos fluidos (modelo de 6 ecuaciones de conservación) que utiliza TRAC muy difícilmente se podría simular, en tiempo real, el núcleo de un BWR con una representación uno a uno de canales hidráulicos y neutrónicos.

Para superar estas limitaciones y eventualmente obtener simulaciones en tiempo real se propone reemplazar el componente CHAN de TRAC por un modelo con un número mínimo de ecuaciones de conservación. La configuración resultante se denomina acoplamiento indirecto de RAMONA y TRAC (S3D-BWR.2).

Adicionalmente en esta nueva configuración se incluye una PC adicional para el monitoreo de variables seleccionadas con MATLAB. Se re-enumeran las computadoras y se cambia la función de la computadora maestra a la PC1 (MATLAB). La configuración final para el acoplamiento indirecto de RAMONA y TRAC se presenta en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Esquema para el acoplamiento indirecto de TRAC y RAMONA (S3D-BWR.2).

Computadora	PC1	PC2	PC3	PC4
<b>Función</b>	Maestro	Neutrónica 3D	RPV3D	TH3D
<b>Código</b>	MATLAB	RAMONA	TRAC	XTH*
<b>Entradas</b>	Variables de graficación	ALFA y TF	TIME, FIJ007 y QDECAY	FIJ007 y QDECAY
<b>Salidas</b>	Sistemas de control	TIME, FIJ007, QDECAY y DT1	Px, Pcin y DT3	ALFA, TF y DT2

\* El modelo del canal CTH se representa como XTH cuando se modela todo el núcleo.

El esquema de este acoplamiento es similar al presentado en el capítulo anterior sólo que la transferencia de calor en las varillas de combustible y la remoción por el refrigerante se substituye por modelos especiales de cada canal de combustible. Estos modelos son similares a los utilizados por RAMONA sólo que se utilizan correlaciones mejoradas y modernas amén de mejoras a la solución numérica. Esto quiere decir que en la nueva configuración se puede tener un canal termohidráulico por cada canal neutrónico, lo que permite conocer con mejor precisión las retroalimentaciones por fracción de vacíos (con mucho la dominante después de las barras de control). Se plantea que el paso de integración sea controlado por la neutrónica tridimensional modelada con RAMONA, la vasija del reactor representada con TRAC y los canales de combustible usen pasos de integración menores que se ajusten a los requerimientos de las ecuaciones a resolver además de ajustarse al tamaño de paso de la neutrónica. También se plantea que las condiciones termohidráulicas de frontera del modelo a desarrollar para los canales

individuales de combustible sean impuestas por los nodos del pleno superior e inferior al núcleo del reactor. Estas condiciones de frontera para los canales individuales son calculadas con el modelo de la vasija implementado con TRAC y una representación colapsada del núcleo, básicamente con tres o cuatro canales de combustible (canales promedio de las regiones de mayor, mediana y menor potencia en el núcleo). Fundamentalmente se plantean las presiones y flujos en esos nodos como condiciones de frontera para los modelos de los canales individuales termohidráulicos. Por otra parte, los cuatro canales promedio reciben a su vez el calor de decaimiento y directo correspondiente calculado por el modelo tridimensional, sólo que colapsado a los canales que representan. Los flujos de entrada a los canales individuales son ajustados a los flujos de los canales promedio modelados por TRAC utilizando factores de normalización obtenidos de la conservación de momento entre ellos.

#### 4.2 El modelo para la termohidráulica de un ensamble de combustible

El modelo simplificado de 4 ecuaciones, para flujo en dos fases con flujo no homogéneo, no equilibrio termodinámico, se derivó de las formulaciones estándar (Delhaye et al., 1981). El modelo resultante es semejante a la termohidráulica de RAMONA pero con mejoras en: el método numérico de solución y las correlaciones para predecir las velocidades relativas de fase y propiedades físicas del agua.

El modelo propuesto resuelve la ecuación de conservación de masa (ECM):

$$\frac{dr_g}{dt} = \frac{\rho_g}{\Delta z} (j_g^- - j_g^+) + \langle \Gamma_v \rangle \quad 4.1$$

La ecuación de conservación de energía (ECE):

$$\frac{d\xi_m}{dt} = \frac{\rho_l (j_l^- h_l^- - j_l^+ h_l^+) + \rho_g (j_g^- - j_g^+) h_g}{\Delta z} + \frac{q_w'' (2\pi R_3)}{A_f} + q_{dir}'' \quad 4.2$$

La transferencia de calor (ETC) en la pastilla de combustible:

$$\frac{d \langle T \rangle}{dt} = \frac{a_2 k_c}{(\rho c)_f} \frac{N_{Bi,c}}{1 + N_{Bi,c} (a_7 + F_{pr})} (T_\infty - \langle T \rangle) + a_1 \frac{\langle q''' \rangle_f}{(\rho c)_f} \quad 4.3$$

Y la ecuación de conservación de momento:

$$\frac{dM}{dt} = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) \quad 4.4$$

En las ecuaciones de conservación del modelo, los símbolos  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $j$  y  $\Gamma$  denotan respectivamente, fracción de vacíos, densidad, flux volumétrico y generación de vapor por unidad de volumen;  $q_{dir}$  es el calor directo depositado en el refrigerante y  $q_w$  es el calor que se conduce a través de la pared del ensamble de combustible. El subíndice l y g se utilizan para denotar la fase líquida y vapor. En la ecuación de conservación de momento,  $f_1$  representa la caída de presión en los espaciadores, en el factor  $f_2$  se toma en cuenta los efectos de gravedad y esfuerzo cortante en la pared y  $f_3$  las caídas de presión por los cambios de fôrma.

La variable de estado para la ECM es la densidad real ( $r_g$ ), para la ECE la variable de estado es la energía de la mezcla ( $\xi_m$ ) y para ETC es la temperatura promedio en el elemento combustible  $\langle T \rangle$  definidos respectivamente por:

$$r_g = \rho_g \langle \alpha \rangle \quad 4.5$$

$$\xi_m = \rho_m e_m$$

Donde  $e_m$  es la energía específica y el simbolo  $\langle \rangle$  denota el valor promedio de celda. Las variables de la ECT se ilustran en forma gráfrica en la siguiente figura:

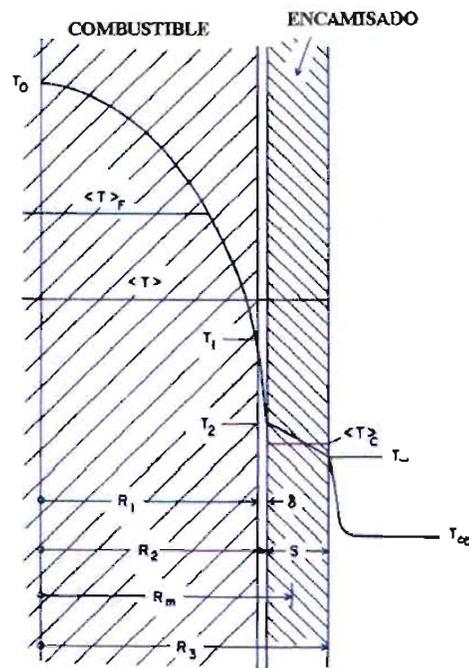


Figura 4.1 Representación de un elemento de combustible.

Donde R representa el radio, T la temperatura y  $N_{Bi}$  es el número de Biot adimensional.

Los términos a la derecha en las ecuaciones 4.1 a 4.4 representan términos fuente y sus valores son conocidos para cada paso de integración por medio de correlaciones. En las siguientes ecuaciones se presentan las correlaciones para evaluar los términos fuente de las ecuaciones de conservación (Wulff, 1984a). La ecuación 4.6 es una correlación para determinar el intercambio de masa entre las fases debido a la ebullición o condensación del refrigerante ( $\Gamma_v$ ) y depende de dos partes: ebullición/condensación en el refrigerante ( $\Gamma_b$ ) y ebullición/condensación debido al calor que se transfiere por la pared ( $\Gamma_w$ ).

$$\Gamma_v = \Gamma_w + \Gamma_b \quad \text{donde:}$$

$$\Gamma_w = \frac{q_w''}{h_{fg} + c_p \left[ (T - T_{sat}) \frac{\rho_l}{\rho_g} + \frac{\Delta T_w}{2} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \right]} \quad 4.6$$

$$\Gamma_b = \frac{5 \times 10^6 + 4 \times 10^7 \alpha (1 - \alpha)}{h_{fg}} \left[ (T - T_{sat}) + 0.3 |T - T_{sat}| \right]$$

En la ecuación 4.7 se muestra la correlación propuesta por Coddington y Macian (2002) para determinar los parámetros del modelo de Drift-Flux. Este modelo determina el deslizamiento de la fase líquida respecto a la fase global  $V_{gj}$ .

$$V_{gj} = (v(1) * p^2 + v(2) * p + v(3)) * G(i) + v(4) * p^2 + v(5) * p + v(6)$$

donde:

$$\begin{aligned} v(1) &= 6.73e-07; & v(4) &= 5.63e-03; \\ v(2) &= -8.81e-05; & v(5) &= -1.23e-01; \\ v(3) &= 1.05e-03; & v(6) &= 8.00e-01 \text{ y} \\ C0 &= 2.57e-3 * p + 1.0062 \end{aligned} \quad 4.7$$

En la ecuación 4.8 se encuentran las correlaciones para evaluar el coeficiente de transferencia de calor  $h_c$  para diferentes tipos de situaciones: convección forzada, ebullición en núcleo, transición a ebullición y ebullición en película.

$$h_c = \frac{k_f}{D_h} Nu \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Convección forzada} \\ \text{para la fase líquida} \end{array} \right. \quad 4.8$$

$$h_c = 2.555 e^{6.45 \times 10^{-7} p} (T_w - T_s)^3 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Ebullición} \\ \text{en núcleo} \end{array} \right.$$

Finalmente, las siguientes ecuaciones son correlaciones para determinar el perfil radial de temperatura en la pastilla del combustible.

$$T_w = T_\infty + \frac{\langle T \rangle - T_\infty}{1 + N_{Bi,c}(a_7 + F_{pr})} \quad 4.9$$

$$\langle T \rangle_f = \frac{\langle T \rangle - T_\infty}{a_1} - \left[ \frac{1}{a_1} - 1 \right] [T_w - T_\infty] (1 + a_3 N_{Bi,c}) + T_\infty$$

Donde  $a_1, a_2, \dots, a_7$  representan los parámetros geométricos y las propiedades físicas del combustible para el modelo de transferencia de calor, definidos por:

$$a_1 = \left( \frac{R_1}{R_3} \right)^2 \quad a_2 = \frac{2}{sR_3} \quad a_3 = \frac{R_3}{R_m} \frac{6R_m - s}{12R_m}$$

$$a_4 = 1 - a_1 \quad a_5 = \frac{R_1^2}{sR_3} \quad a_6 = \left( \frac{\delta}{k} \right)_s \frac{1}{R_1}$$

$$a_7 = a_3 + \left( \frac{R_1}{R_m} \right)^2 \frac{6R_m + s}{12R_3} \quad s = R_3 - R_2$$

$$N_{Bi,c} = \frac{h_c s}{\bar{k}_c}$$

$$F_{pr} = a_5 \bar{k}_c \left[ \frac{1}{4\bar{k}_f} + a_6 \right]$$

Las condiciones de frontera del canal hidráulico se obtienen de RAMONA. Se requieren la potencia inmediata y la potencia de decaimiento. A la entrada del canal hidráulico se especifican el flujo másico del refrigerante y la temperatura del refrigerante. A la salida del canal se especifica la presión (véase la figura 3.4).

Se utilizó la función ODE45 de MATLAB para resolver las ecuaciones de conservación en conjunto con las condiciones de frontera y las condiciones iniciales. El método numérico, que utiliza la función ODE45, es de Runge-Kutta de 4º orden. Para los propósitos del acoplamiento se obtuvo otra versión de este modelo en lenguaje Fortran. Los resultados con las versiones de MATLAB y Fortran se compararon obteniéndose resultados muy parecidos, con desviaciones menores a 0.1% en la fracción de vacíos.

### Procedimiento de solución:

Para cada paso de integración se debe evaluar el lado derecho de las ecuaciones diferenciales 4.1 a 4.4. Se inicia evaluando las propiedades físicas del refrigerante; en el apéndice A se describen las correlaciones que fueron utilizadas para la temperatura de saturación  $T_s(P)$ , densidad de líquido saturado  $\rho_l(P)$ , densidad de vapor saturado  $\rho_g(P)$ , calor latente de evaporación  $h_{fg}(P)$ , calor específico para líquido  $c_{p,l}(T_s)$ , calor específico

para vapor saturado  $c_{p,v}(T_s)$ , densidad para líquido subenfriado/sobrecalentado  $\rho_l(P, T_l)$  y energía interna específica del líquido subenfriado  $u_l(P, T_l)$ . Ahora se pueden evaluar la fracción de vacíos promedio, la energía interna del líquido, la temperatura del refrigerante y la densidad de la mezcla para cada celda axial  $k$  del canal:

$$\begin{aligned}
 \langle \alpha \rangle_k &= \frac{1}{\rho_g(P)} \frac{(m_g)_k}{V_k} \\
 \langle u_l \rangle_k &= \frac{\langle \rho_m u_m \rangle_k - \rho_g u_g \langle \alpha \rangle_k}{\rho_l(1 - \langle \alpha \rangle_k)} \\
 \langle T_{inf} \rangle_k &= T(P) + \frac{\langle u_l \rangle_k}{c_p} \\
 \langle \rho_m \rangle_k &= \langle \alpha \rangle_k \rho_g + (1 - \langle \alpha \rangle_k) \rho_l
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Con estos valores se determina la fracción de vacíos en la interfaz:

$$\begin{aligned}
 \alpha(z)_1 &= \frac{1}{6} [2 \langle \alpha \rangle_1 + 5 \langle \alpha \rangle_2 - \langle \alpha \rangle_3] \\
 \alpha(z)_k &= \frac{1}{6} [- \langle \alpha \rangle_{k-1} + 5 \langle \alpha \rangle_k + 2 \langle \alpha \rangle_{k+1}], \quad k = 2, \dots, N_c - 1 \\
 \alpha(z)_{N_c} &= \frac{1}{6} [2 \langle \alpha \rangle_{N_c-2} - 7 \langle \alpha \rangle_{N_c-1} + 11 \langle \alpha \rangle_{N_c}]
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Utilizando las condiciones de frontera correspondientes a la temperatura del encamisado, calor directo y calor de pared que se reciben en cada celda axial se evalúan las tasas de evaporación de acuerdo con la ecuación 4.6.

Hasta este punto se conocen los valores necesarios para evaluar los parámetros del modelo de drift flux y calcular  $V_{gi}$  y  $C_0$  en cada interfaz entre celdas (ec. 4.7).

Con las variables de frontera conocidas y el perfil de temperatura inicial de  $\langle T \rangle$  se evalúa el coeficiente de transferencia de calor del refrigerante  $h_c$  de acuerdo a las correlaciones de Dittus-Boelter y Jens-Lottes para la región subenfriada y ebullición respectivamente. Se implementó un método iterativo para determinar el valor correcto de  $h_c$ . En el procedimiento de cálculo siempre se elige el valor más alto de  $h_c$ . El primer cálculo para  $T_w$  se realiza utilizando el valor inicial para la variable de estado  $\langle T \rangle$ . Para el siguiente incremento de tiempo se utiliza el valor de  $\langle T \rangle$  correspondiente al paso anterior de integración. Ahora puede evaluarse el perfil de temperatura en dirección radial y determinar la temperatura del combustible promedio para cada celda axial.

Con todos los valores conocidos del lado derecho de las ecuaciones de conservación, se procede a integrar utilizando el método ODE45 de MATLAB. El proceso de cálculo se repite para otro paso de integración hasta alcanzar el tiempo de simulación requerido.

### Análisis de resultados:

La figura 4.2 presenta las variables de estado para la ECM y ECE. En esta figura se muestra la respuesta del modelo a un transitorio NULO hasta alcanzar el estado estacionario en 3.8 segundos. La figura 4.3 muestra los perfiles que se obtienen con el modelo en estado estacionario a 3.8 segundos y se comparan con el caso de referencia de RAMONA. Los valores que se obtienen con MATLAB son ligeramente mayores (0.1%) para la temperatura del refrigerante. En las otras variables se obtienen desviaciones menores.

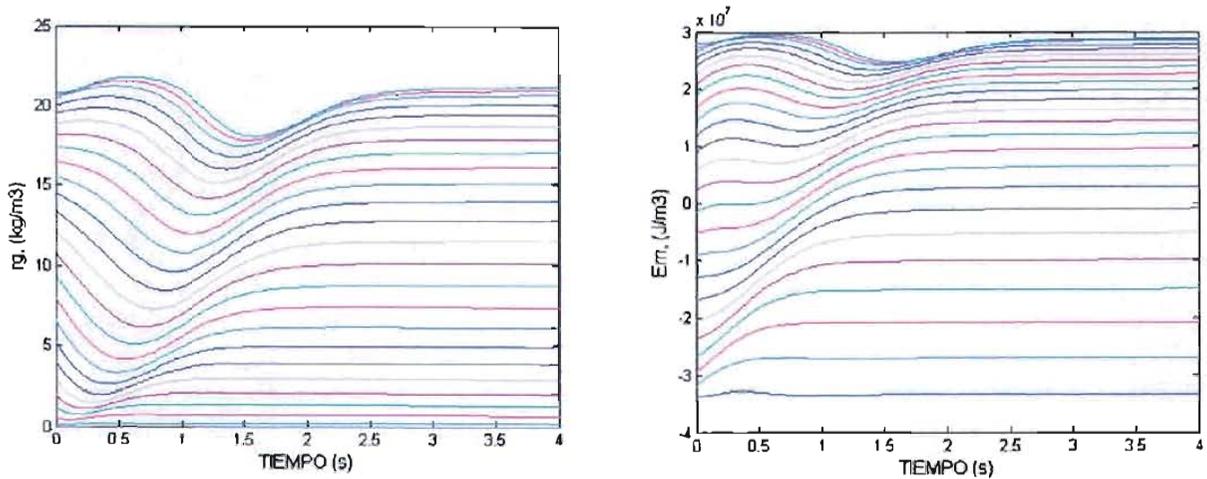


Figura 4.2 Perfiles de las variables de estado para la ECM y ECE.

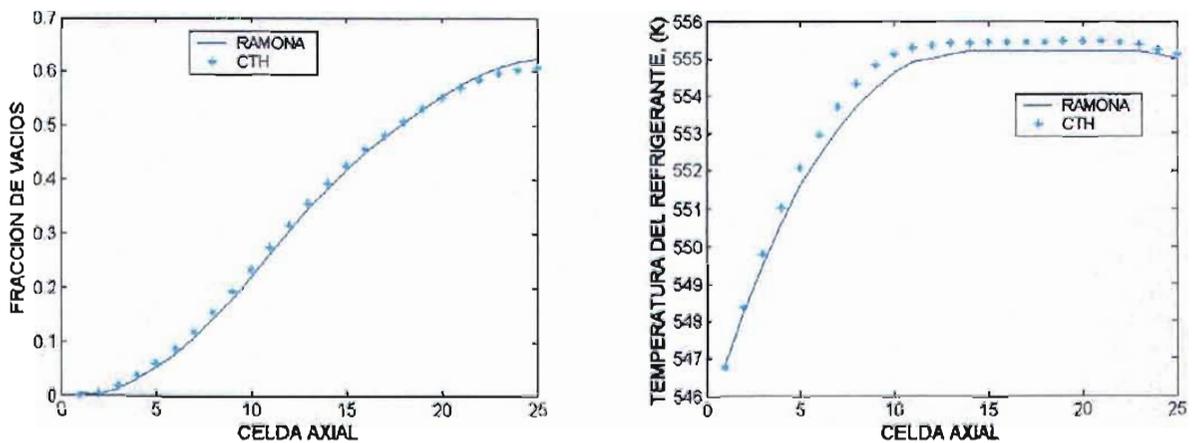


Figura 4.3 Comparación de los perfiles obtenidos con el modelo CTH y RAMONA.

La principal conclusión de estas pruebas es que se debe usar el simulador XTH para modelar el núcleo del reactor porque evita las oscilaciones numéricas que se presentan en la sustitución directa de la termohidráulica de RAMONA por la de TRAC; el uso del simulador XTH tiene beneficios adicionales, ya que: 1) Es más rápido que el componente CHAN de TRAC, 2) No difiere apreciablemente de RAMONA en estado estacionario, 3) Utiliza mejores correlaciones para calcular los parámetros  $Co$  y  $vgj$  y 4) La transferencia de calor es considerablemente más rápida y exacta que el método predictor y corrector con varios nodos radiales utilizado por RAMONA.

Tabla 4.2 Tiempo de CPU requerido para modelar un ensamble de combustible con el modelo CTH.

	Tiempo CPU (s)
MATLAB (Windows)	0.96t
FORTTRAN (en Cygwin)	1.04t
FORTTRAN (en Linux)	0.54t
<p>Nota: TRAC (Cygwin) requiere 12.5t            TRAC (Linux) requiere 6.68t (Véase tabla 3.3)            Donde t representa el tiempo simulado.</p>	

### 4.3 Verificación del acoplamiento indirecto

En esta sección se describen tres transitorios representativos para verificar el acoplamiento del S3D-BWR.2. En la tabla 4.3 se resumen las pruebas y posteriormente se describen en detalle en las siguientes secciones.

Tabla 4.3 Transitorios para verificar el acoplamiento indirecto de RAMONA y TRAC.

Pruebas específicas:	Objetivo:	Resultados:
<b>2.0</b> Modelar un transitorio de movimiento de barras.	Verificar el acoplamiento de RAMONA sustituyendo 1 canal (CTH) y 111 canales (XTH). Comparar los resultados con RAMONA y el S3D-BWR.1.	Los resultados muestran un comportamiento más realista del S3D-BWR.2 con desviaciones menores al 12% respecto a RAMONA original.

<p><b>3.0</b> Modelar un transitorio por perturbación del agua de alimentación.</p>	<p>Verificar el acoplamiento de RAMONA con el modelo XTH.</p>	<p>Los resultados muestran un comportamiento cualitativo muy semejante. Se observan desviaciones menores a 11% respecto a RAMONA original.</p>
<p><b>4.0</b> Modelar un transitorio de oscilaciones en la potencia generadas por ondas de densidad en el flujo de alimentación.</p>	<p>Verificar el acoplamiento de RAMONA con el modelo XTH.</p>	<p>Se observan oscilaciones más pronunciadas en RAMONA original que en el S3D-BWR.2. En este caso se obtuvieron desviaciones menores al 10% respecto a RAMONA original.</p>

#### 4.3.1 Transitorio de movimiento de barras (prueba 2.0)

Plataforma: 4 PCs  
 Sistema operativo: Linux Mandrake 7.1 y Windows  
 Programas fuente: TRAC versión 2000.1 de PSU  
 RAMONA-3B  
 PVM 3.4 para Linux y Windows  
 Directorio: /home/trac/bf1/source/pvm02/trac\_linux

**Descripción:** Esta prueba consta de cuatro partes: (1) Modelar el transitorio de movimiento de barras a  $t=30$  segundos con el código original RAMONA, el cual se usará como referencia, (2) Reemplazar la temperatura de combustible y la fracción de vacíos del canal 1 calculado con RAMONA por los valores del modelo CTH y (3) Reemplazar la temperatura de combustible y la fracción de vacíos de los 111 canales hidráulicos.

#### Resultados:

En las figuras 4.4 a 4.7 se presentan los perfiles de la fracción de vacíos, potencia inmediata, temperatura de combustible y temperatura del refrigerante. Todos estos perfiles corresponden al canal hidráulico 1 de RAMONA. En la parte izquierda de estas figuras se muestran los perfiles correspondientes a las celdas axiales 2, 13 y 25. En la parte derecha se muestran los perfiles en 3D como función de las 25 celdas axiales y el tiempo de simulación.

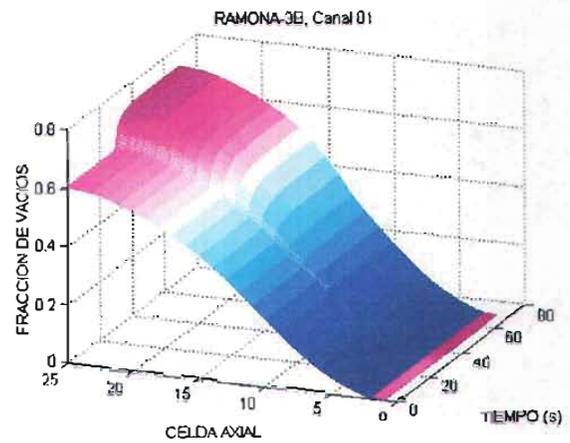
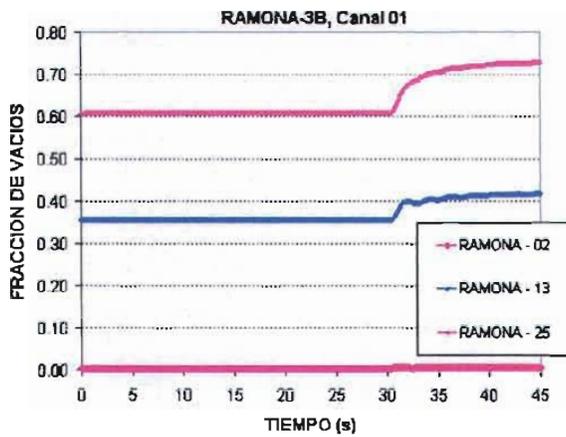


Figura 4.4 Perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA.

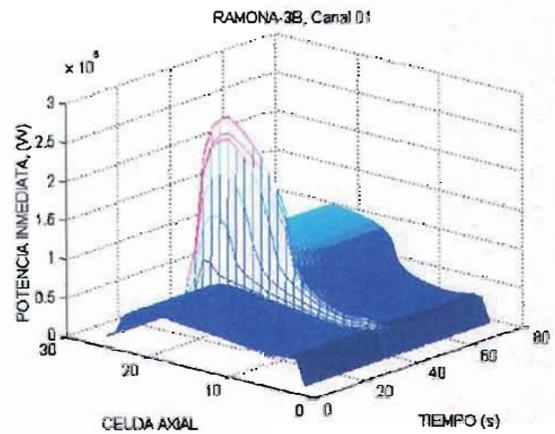
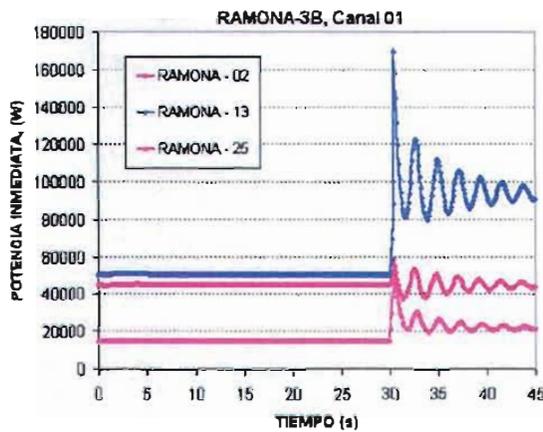


Figura 4.5 Perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA.

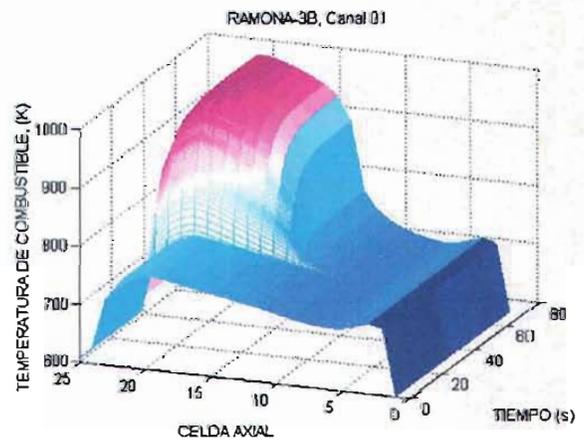
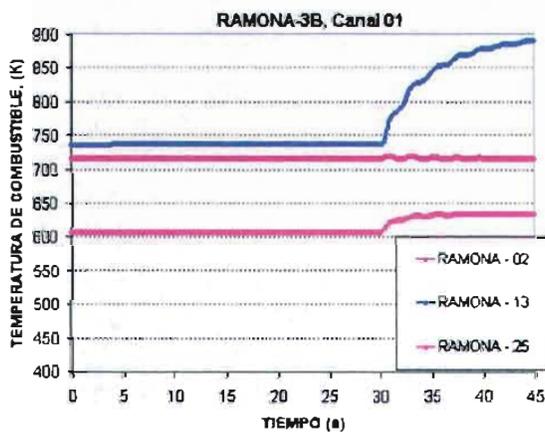


Figura 4.6 Perfiles de la temperatura de combustible obtenidos con RAMONA.

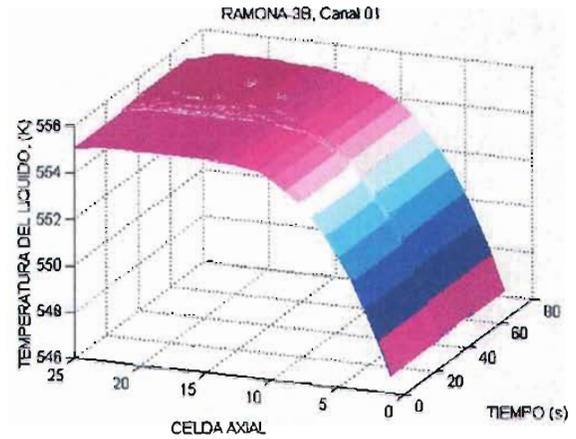
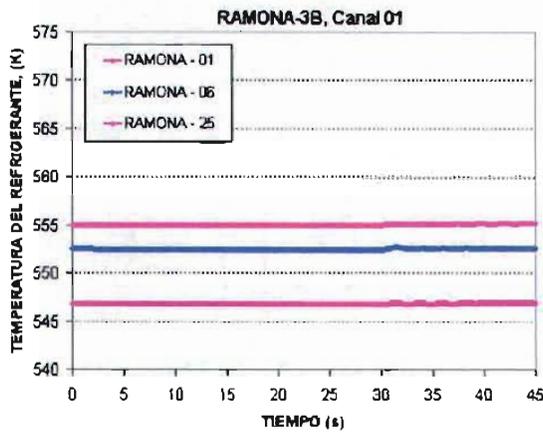


Figura 4.7 Perfiles de la temperatura de refrigerante obtenidos con RAMONA.

Los perfiles comparados con el simulador CTH se muestran en la figura 4.8.

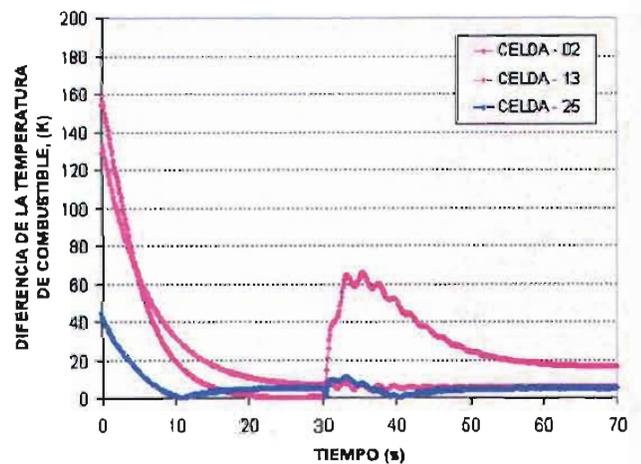
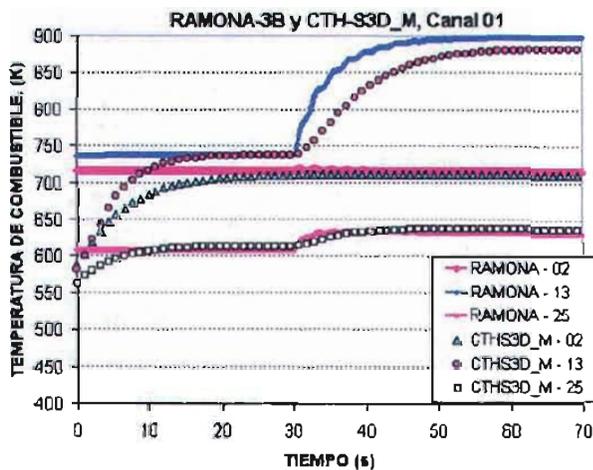
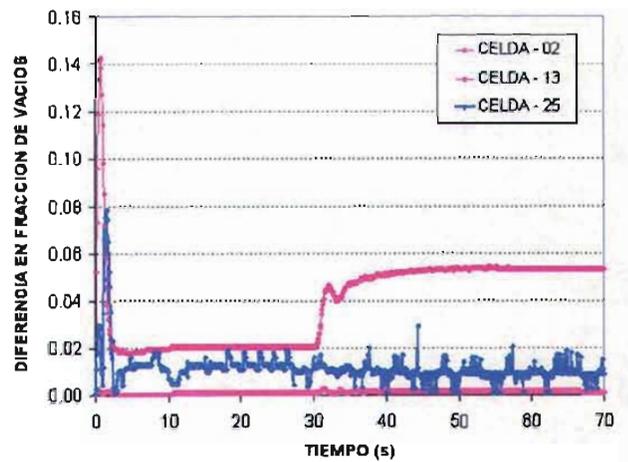
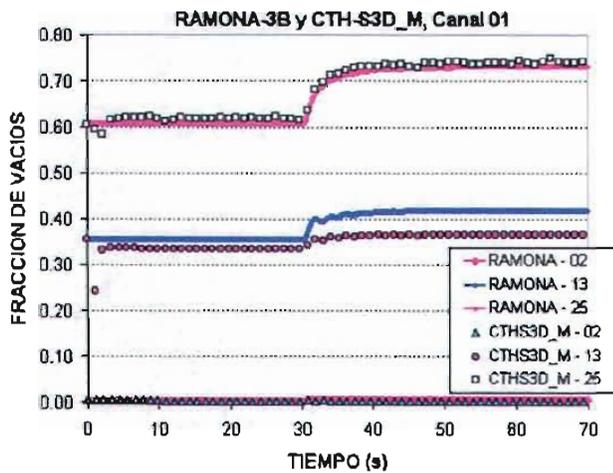


Figura 4.8 Perfiles obtenidos con RAMONA y CTH versión MATLAB.

Los perfiles obtenidos con el simulador CTH de la versión FORTRAN y RAMONA se comparan en la figura 4.9.

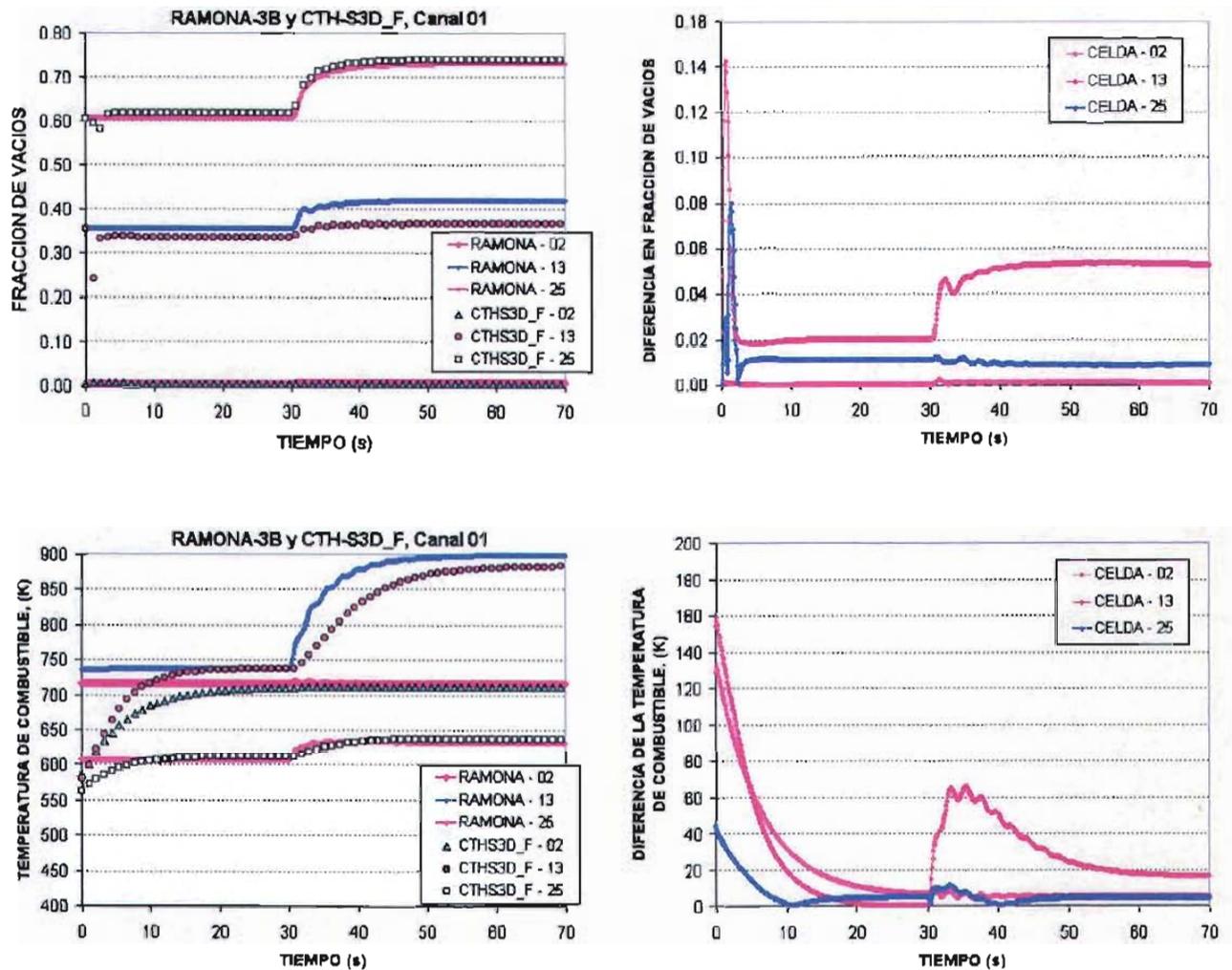


Figura 4.9 Perfiles obtenidos con RAMONA y CTH versión FORTRAN.

La figura 4.10 presenta los perfiles que se obtienen cuando se acopla un canal del CTH a RAMONA. En esta prueba la sustitución de la fracción de vacíos y la temperatura de combustible se realiza a los 15 segundos. El movimiento de barras inicia a los 20 segundos.

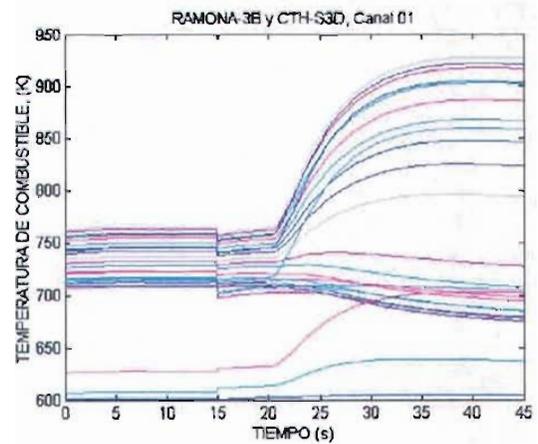
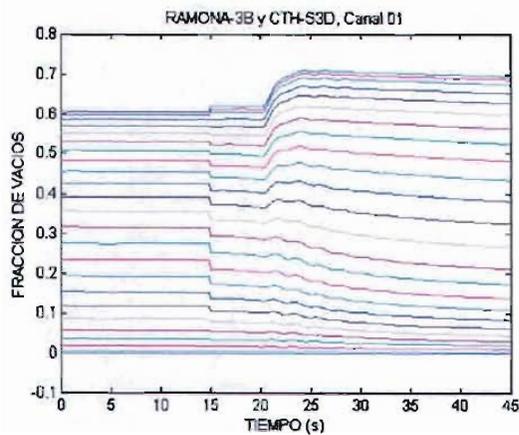


Figura 4.10 Perfiles obtenidos cuando se acopla un canal del CTH a RAMONA.

La figura 4.11 presenta los perfiles que se obtienen cuando se acoplan 111 canales del CTH a RAMONA. Se observa que la sustitución de la fracción de vacíos se realiza paulatinamente, inicia a los 3 segundos y termina a los 12 segundos. La temperatura de combustible se sustituye en  $t=15$  segundos. El transitorio de movimiento de barras inicia a los 30 segundos.

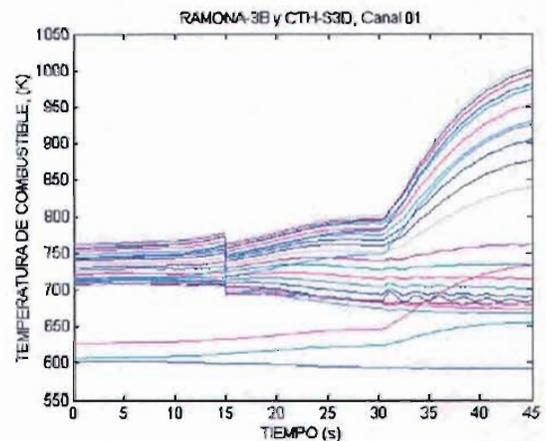
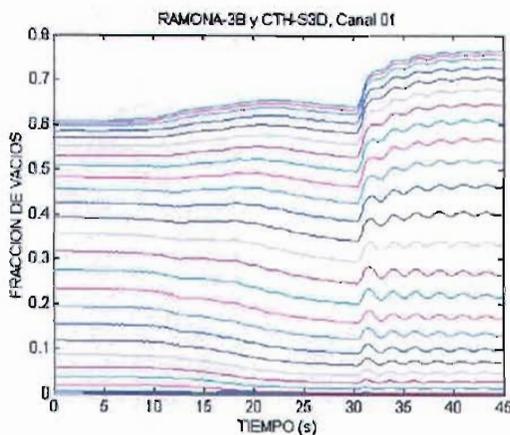


Figura 4.11 Perfiles obtenidos con 111 canales acoplados del CTH a RAMONA.

### Conclusiones:

Para los fines del acoplamiento se obtuvieron dos versiones del CTH: la primera versión se realizó en MATLAB y se utilizó la función ODE 45 (Rungge-Kutta de 4o orden) para resolver las ecuaciones de conservación. La segunda versión se escribió en lenguaje FORTRAN en donde se implementó el mismo método numérico utilizado por la versión MATLAB.

Los perfiles que se obtuvieron con el simulador CTH para la versión FORTRAN y MATLAB son muy semejantes y se presentan diferencias de máximo 0.1%. Estas diferencias se deben principalmente al paso de integración que se utilizó en FORTRAN; el cual fue una constante de 0.001 segundos. En tanto que en MATLAB el tamaño de paso es una variable (para ser más rápido/optimo).

Se realizaron pruebas de acoplamiento para integrar el modelo CTH al entorno virtual. En una primera serie de pruebas se modeló el transitorio de movimiento de barras utilizando archivos para imponer las condiciones de frontera. Ambos modelos tienen un comportamiento semejante y las principales diferencias se presentan en lo referente al modelo de transferencia de calor (5%, 40 K en diferencia).

Finalmente se realizaron pruebas para el acoplamiento del CTH al entorno virtual, en donde existe retroalimentación dinámica de las condiciones de frontera. Se realizaron pruebas por separado para acoplar un canal y 111 canales hidráulicos de RAMONA.

#### 4.3.2 Transitorio por perturbación del agua de alimentación (prueba 3.0)

Sistema operativo: Linux Mandrake 7.1 y Windows  
 Programas fuente: TRAC versión 2000.1 de PSU  
 RAMONA-3B  
 PVM 3.4 para Linux y Windows  
 Directorio: /home/trac/bf1/source/pvm02/trac\_linux

**Descripción:** Se modela un transitorio con una perturbación en el agua de alimentación. Las condiciones de estado estacionario antes de iniciar el transitorio se presentan en la siguiente figura 4.12.

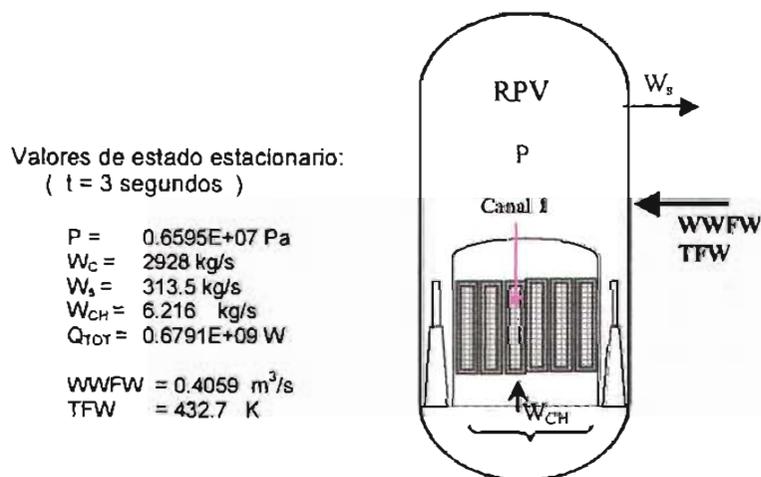


Figura 4.12 Condiciones de estado estacionario antes del transitorio.

La temperatura del agua de alimentación (TFW, 432.7 K) se incrementa linealmente a 482.7 K en un lapso de 20 segundos. La perturbación se presenta en la figura 4.13.

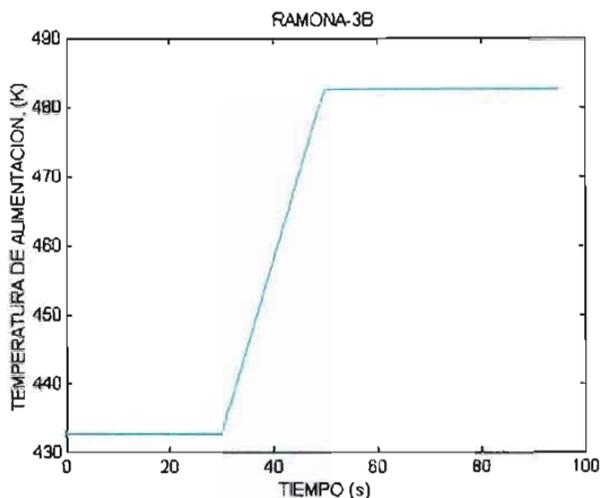


Figura 4.13 Perturbación de la temperatura del agua de alimentación (TFW).

El caso tiene las siguientes características adicionales:

La perturbación de TFW inicia a los 30 segundos.

El caso se modela hasta los 90 segundos.

**Resultados:**

La perturbación en la temperatura del agua de alimentación provoca cambios en el flujo del agua de alimentación (figura 4.14). Los valores de referencia obtenidos con RAMONA para el canal 1 se presentan en las figuras 4.15 y 4.16.

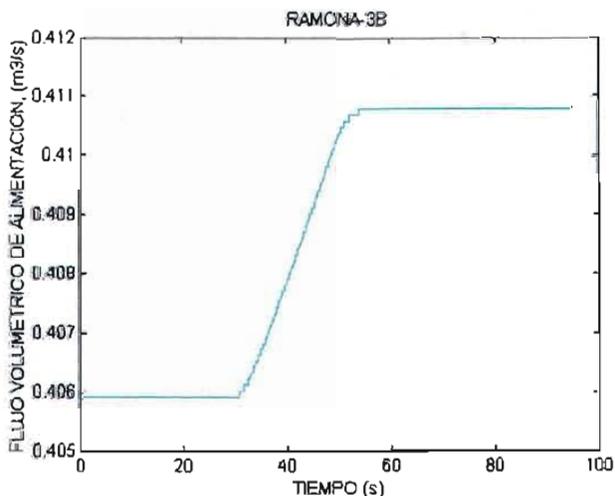


Figura 4.14 Flujo volumétrico de alimentación obtenido con RAMONA.

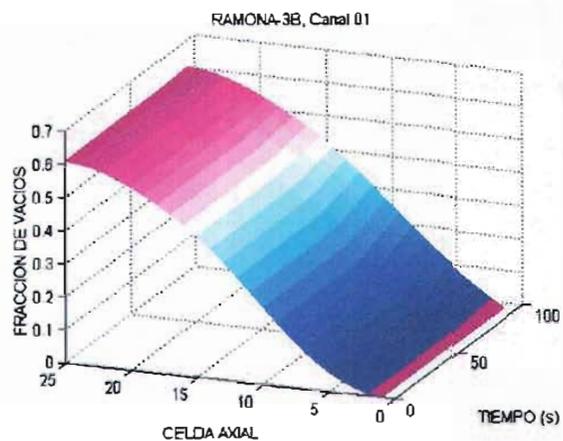
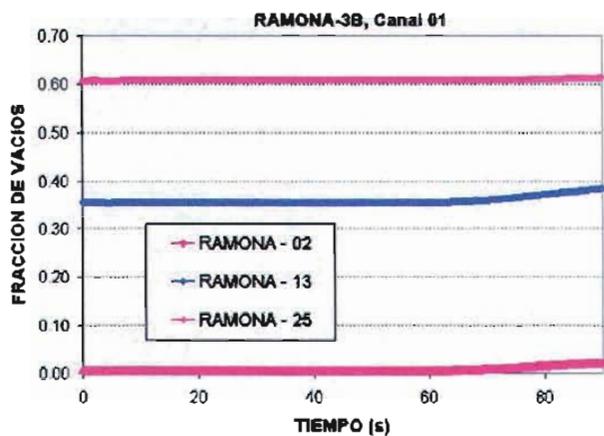


Figura 4.15 Perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA.

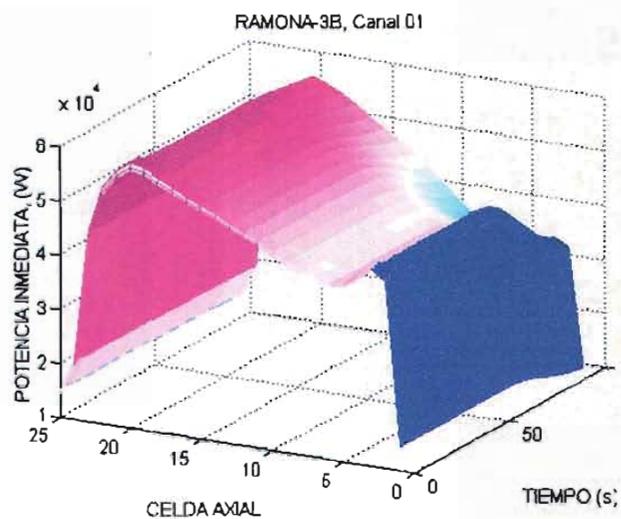
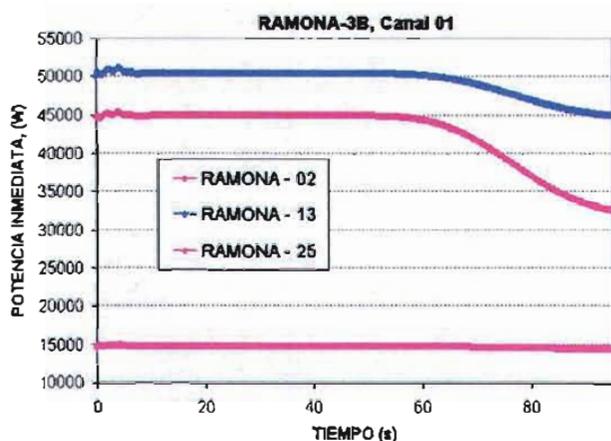


Figura 4.16 Perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA.

Los resultados del S3D-BWR.2 comparados con RAMONA se encuentran en la siguiente figura 4.17. Se observan diferencias pequeñas del orden de 0.04% para la fracción de vacíos. Diferencias mayores se presentan en la potencia inmediata (11%).

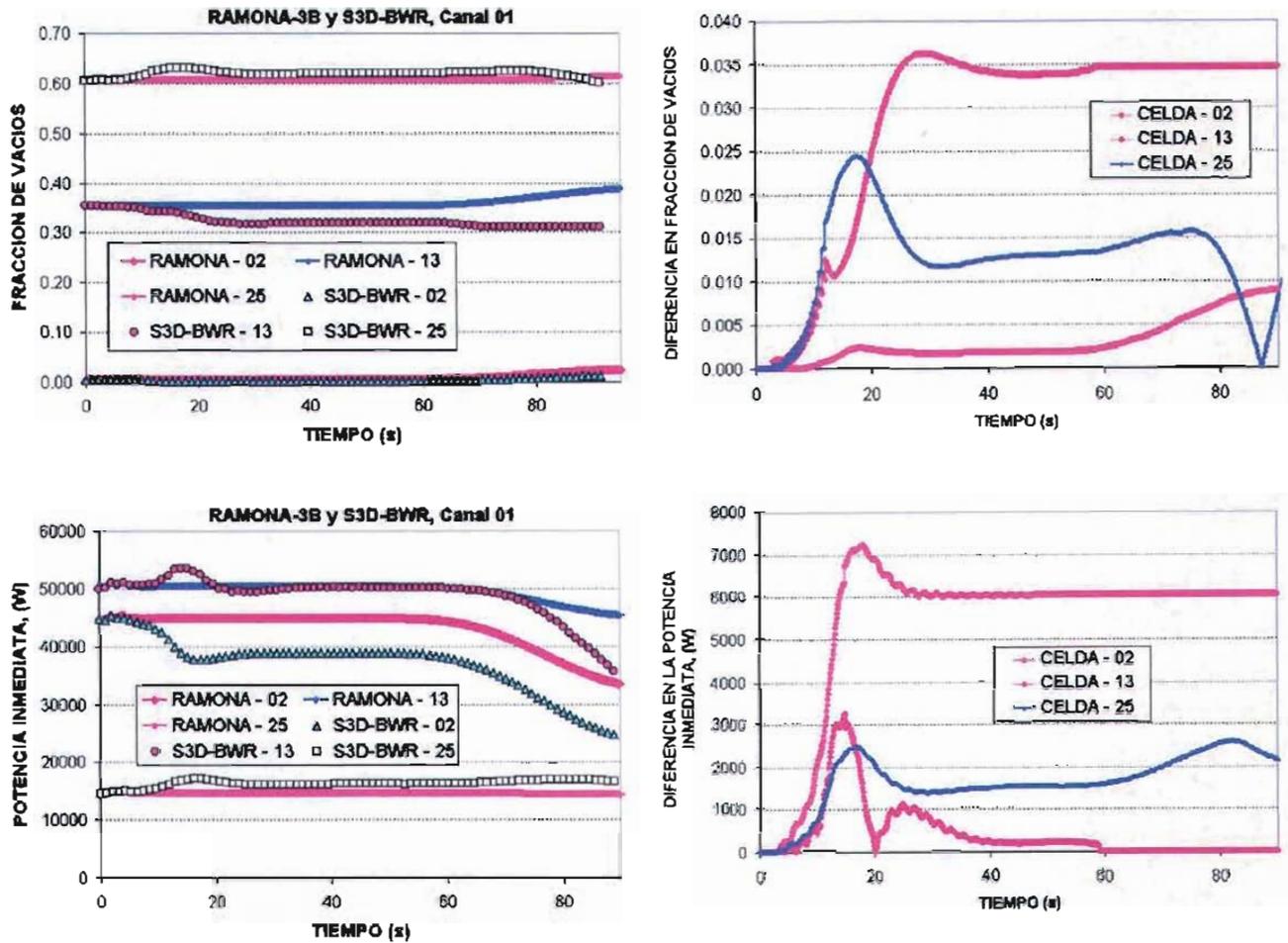


Figura 4.17 Perfiles obtenidos con RAMONA y S3D-BWR.2.

#### 4.3.3 Transitorio por ondas de densidad (prueba 4.0)

Sistema operativo	Linux Mandrake 7.1 y Windows
Programas fuente:	TRAC versión 2000.1 de PSU RAMONA-3B PVM 3.4 para Linux y Windows
Directorio:	/home/trac/bf1/source/pvm02/trac_linux

**Descripción:** Se modela un transitorio de oscilación en la potencia generada por cambios en el flujo del agua de alimentación. Las condiciones de estado estacionario antes de iniciar el transitorio se presentan en la figura 4.18.

Valores de estado estacionario:  
( t = 3 segundos )

P = 0.6595E+07 Pa  
 $W_C = 2928$  kg/s  
 $W_s = 313.5$  kg/s  
 $W_{CH} = 6.216$  kg/s  
 $Q_{TOT} = 0.800E+09$  W

WWFW = 0.4059 m<sup>3</sup>/s  
 TFW = 432.7 K

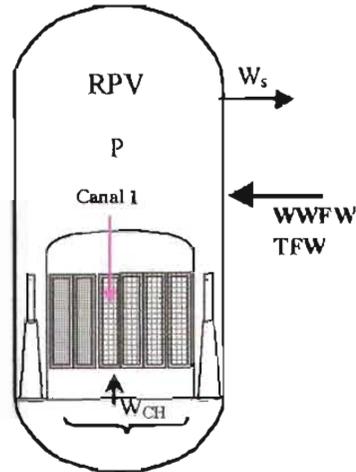


Figura 4.18 Condiciones de estado estacionario antes del transitorio.

La perturbación para el flujo del agua de alimentación (WWFW) es una combinación de rampa lineal y función senoidal. La perturbación principal esta dada por la función senoidal de acuerdo a la relación:

$$x(t) = x_0[1 + A \text{ sen } \omega(t - t_0)]$$

En donde se utilizan los siguientes valores:

$x_0 = 0.4059$ ; Flujo volumétrico inicial, (m<sup>3</sup>/s)  
 A = 0.8 Amplitud  
 $\omega = 5.0$  Frecuencia, (rad/s)

La perturbación resultante por rampa lineal y función senoidal se presenta en la figura 4.19.

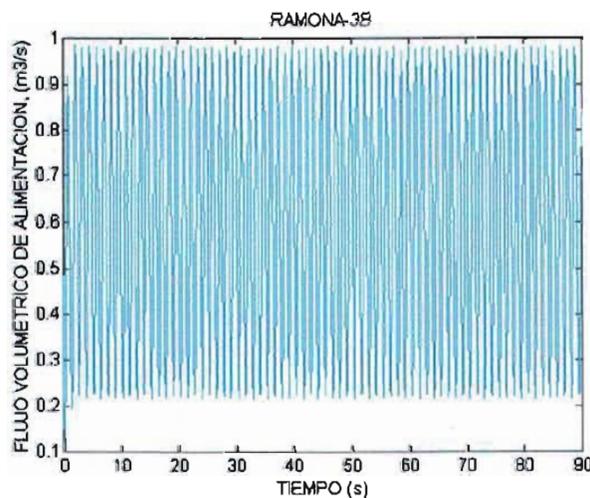


Figura 4.19 Perturbación del flujo volumétrico del agua de alimentación (WWFW).

El caso tiene las siguientes características adicionales:  
La perturbación de WWFW inicia a los 0.1 segundos.  
El caso se modela hasta los 90 segundos.

### Resultados:

La perturbación del flujo volumétrico de alimentación provoca oscilaciones en todas las variables para el tiempo  $t=75$  segundos. Los valores de referencia obtenidos con RAMONA se presentan en las figuras 4.20 a 4.22.

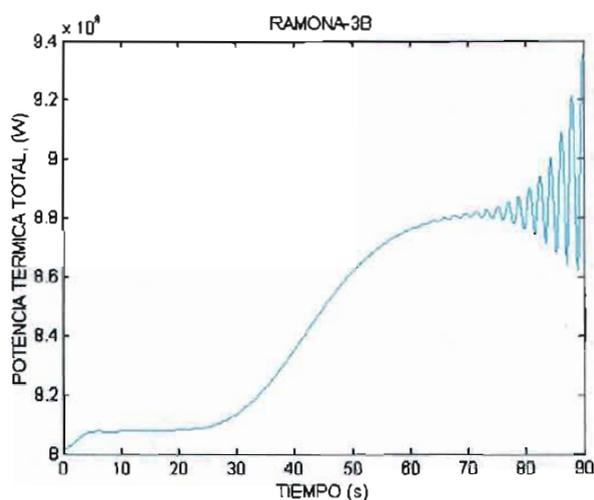


Figura 4.20 Potencia térmica total obtenida con RAMONA.

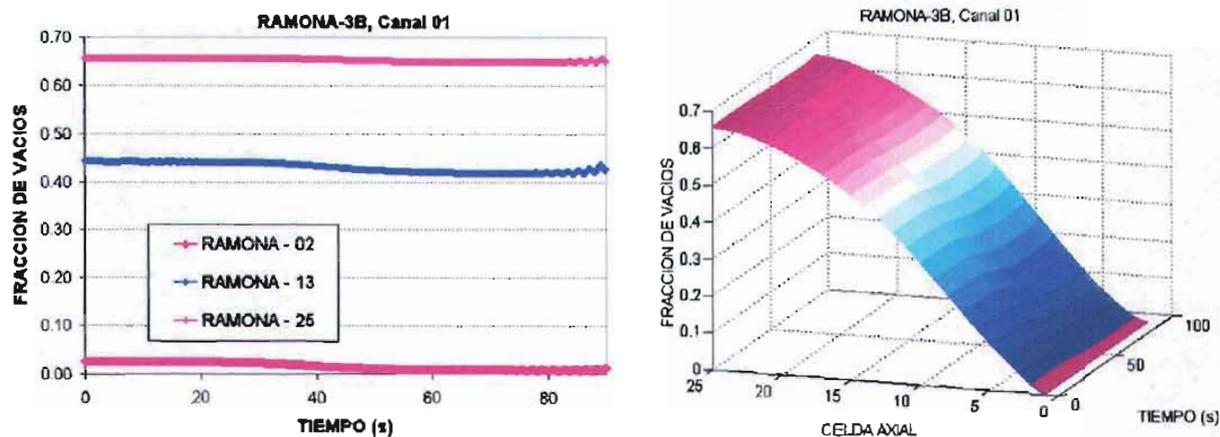


Figura 4.21 Perfiles de la fracción de vacíos obtenidos con RAMONA.

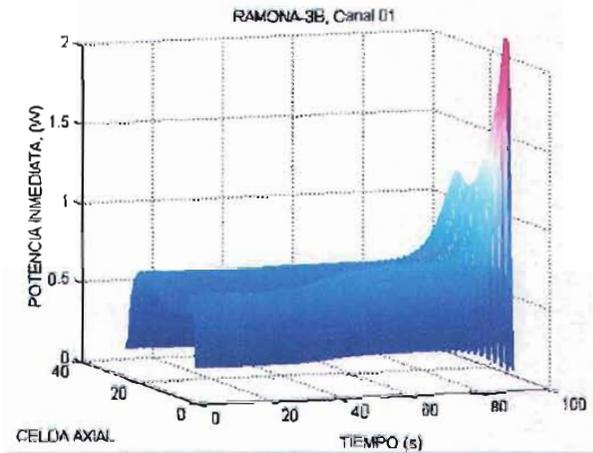
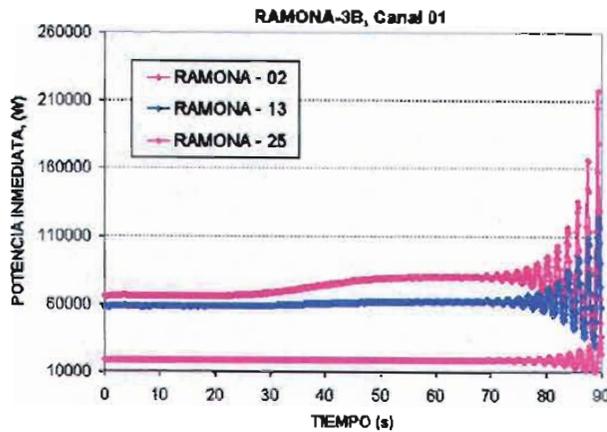
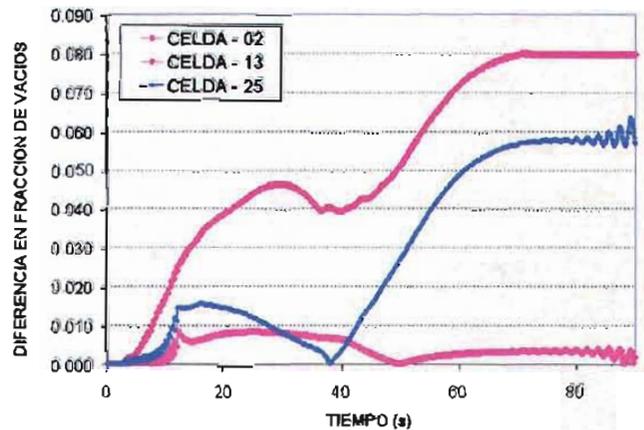
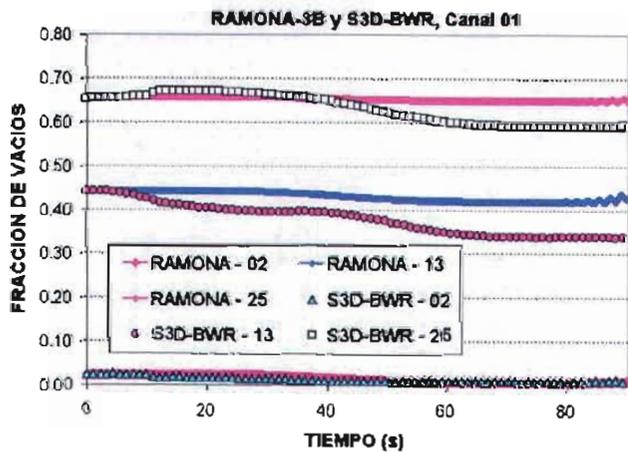


Figura 4.22 Perfiles de la potencia inmediata obtenidos con RAMONA.

Los resultados del S3D-BWR.2 comparados con RAMONA se encuentran en la siguiente figura 4.23. Se observan diferencias del orden de 0.08% para la fracción de vacíos y 12% para la potencia.



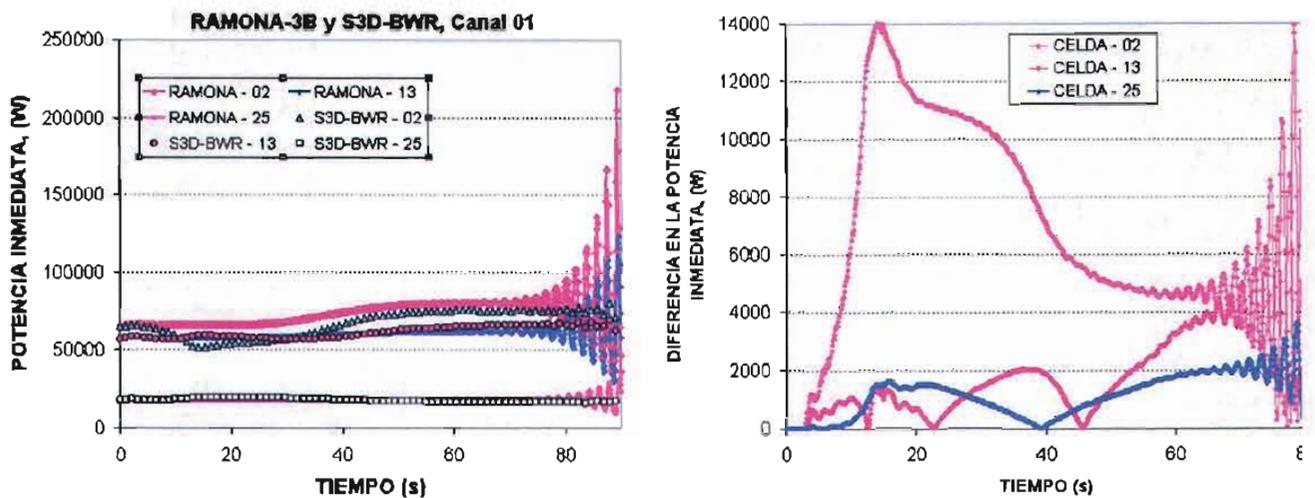


Figura 4.23 Comparación de los perfiles obtenidos con RAMONA y S3D-BWR.2.

#### 4. 4 Conclusiones del acoplamiento indirecto

En este capítulo se presentó una alternativa de acoplamiento para RAMONA y TRAC debido a que los resultados obtenidos en el acoplamiento directo de ambos códigos pueden ser mejorados. Esta propuesta fue sustituir el componente CHAN de TRAC por un modelo de 4 ecuaciones de conservación.

El modelo de 4 ecuaciones de conservación se denominó CTH cuando se modela sólo un ensamble de combustible y XTH cuando se modelan todos los ensambles de combustible (111 canales cuando se modela  $\frac{1}{4}$  del núcleo del reactor).

En esta nueva propuesta se verificó el acoplamiento con tres transitorios: movimiento de barras de control, perturbación del agua de alimentación y oscilaciones por ondas de densidad. Cualitativamente los resultados obtenidos en estas pruebas muestran un comportamiento muy semejante a RAMONA original. Cuantitativamente se presentaron desviaciones de diferente magnitud, el transitorio más separado respecto a RAMONA original es el originado por ondas de densidad con desviaciones de 0.08% en la fracción de vacíos y 12% en la potencia inmediata.

Capítulo 5:

## *Conclusiones y recomendaciones*

En el capítulo 5 se presenta un análisis global de los resultados que se han obtenido. Al final se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones.

## 5.1 Conclusiones

Se ha propuesto una metodología para acoplar la neutróica de RAMONA con el modelo termohidráulico de TRAC mediante PVM. La arquitectura del código acoplado es homogénea respecto a la plataforma (la cual está constituida por varias PCs) y es heterogénea respecto al sistema operativo (Linux-Windows). Dos versiones de acoplamiento fueron analizadas: el acoplamiento directo y el acoplamiento indirecto. En ambos casos la metodología propuesta permite la sincronización sin modificaciones apreciables en los algoritmos lógicos de elección del tamaño de paso de integración.

El acoplamiento directo se implementó en 3 PCs. En la PC1 se modeló la neutróica con RAMONA, en la PC2 la termohidráulica de los ensambles de combustible y en la PC3 la vasija del reactor. Esta versión de acoplamiento se denominó S3D-BWR.1. La idea de acoplar directamente las mejores capacidades de RAMONA y TRAC fue probada. Los resultados obtenidos indican que utilizar el componente CHAN de TRAC para modelar la termohidráulica del núcleo requiere grandes recursos computacionales y el tiempo de CPU está muy alejado del tiempo real de simulación.

Para superar estas limitaciones se propuso un modelo de 4 ecuaciones de conservación y correlaciones mejoradas para evaluar parámetros del modelo de Drift Flux. El objetivo de este modelo fue reemplazar el componente CHAN de TRAC en la PC2. El modelo se programó y se obtuvieron dos versiones: el primero en código MATLAB y el segundo en lenguaje FORTRAN. El modelo se comparó con RAMONA original con resultados muy semejantes. En esta nueva propuesta de acoplamiento se incluye una PC adicional en donde se ejecuta MATLAB en Windows. Esta versión del acoplamiento se denominó S3D-BWR.2; es más rápida con mejores características y fue utilizado para simular varios transitorios obteniéndose resultados satisfactorios.

El código acoplado resultante S3D-BWR.<sub>2</sub> tiene varias características importantes:

- Es versátil al tener una estructura modular; esta característica permite la posibilidad de agregar/conectar con otros códigos o modelos mecánicos con las condiciones de frontera dinámicas; obteniéndose simulaciones más detalladas en cualquier parte de una central BWR o avanzada.
- Es más fácil monitorear los resultados de las simulaciones con gráficos en 2 y 3 dimensiones utilizando la interfaz con MATLAB.
- Se obtienen simulaciones más detalladas porque se modelan los canales hidráulicos y neutrónicos en relación 1 a 1.

- Se puede explorar la posibilidad de obtener simulaciones en tiempo real utilizando nuevos modelos de computadoras en la arquitectura de acoplamiento.

Un ejemplo de la versatilidad es conectar los sistemas de control del S3D-BWR.2 al módulo gráfico SIMULINK de MATLAB para manipular los controles de toda la planta en forma gráfica y dinámica. Otro ejemplo es crear una interfaz desde los módulos de neutrónica y de transferencia de calor al código SCADAP para modelar deformaciones en los ensambles de combustible.

Se concluye que si fue posible obtener una herramienta computacional-virtual utilizando las mejores capacidades de RAMONA y TRAC.

## **5.2 Recomendaciones**

Modelar más casos con el S3D-BWR.2 para verificar el acoplamiento y posteriormente validar el acoplamiento utilizando datos experimentales y/o benchmarks.

Al igual que cualquier código de ingeniería nuclear, los módulos principales del código acoplado aún tienen correlaciones empíricas para evaluar términos fuentes en las ecuaciones de conservación. Se recomienda mejorar estas correlaciones a medida que se cuenten con mejores modelos en la literatura abierta.

Demostrar la versatilidad que tiene el S3D-BWR.2 haciendo otras interfaces y modelando transitorios en reactores avanzados.

Se recomienda explorar el entorno virtual con otras arquitecturas (estaciones de trabajo o cluster de procesadores) y las nuevas tendencias de interconexión (nuevos estándares en LAN, banda ancha, fibra óptica, redes inalámbricas, etc).

## Apéndice A Funciones para evaluar propiedades físicas del agua.

El modelo CTH, para modelar la termohidráulica de los ensambles de combustible, requiere de correlaciones para evaluar las propiedades físicas del agua y vapor de agua. En la siguiente ecuación se presentan las correlaciones que fueron utilizadas para evaluar las propiedades físicas del agua.

$$\begin{aligned}
 T_s(P) &= \frac{\sum_{i=0}^5 a_i P_i}{\sum_{i=0}^5 b_i P_i} & \rho_f(T_s) &= \frac{\sum_{i=0}^3 c_i T_s^i}{\sum_{i=0}^4 d_i T_s^i} \\
 \rho_g(T_s) &= \frac{\sum_{i=0}^5 e_i T_s^i}{\sum_{i=0}^3 f_i T_s^i} & h_{fg}(T_s) &= \frac{\sum_{i=0}^3 g_i T_s^i}{\sum_{i=0}^4 h_i T_s^i} \\
 c_{p,l}(T_s) &= \frac{\sum_{i=0}^4 i_i T_s^i}{\sum_{i=0}^3 j_i T_s^i} & \rho_l(P, T_l) &= \rho_f(T_s) + \sum_{i=0}^2 k_i P_i (T_l - T_s) \\
 u_l(P, T_l) &= c_{p,l} (T_l - T_s) & k_l(T_s) &= \frac{\sum_{i=0}^4 l_i T_s^i}{\sum_{i=0}^3 m_i T_s^i} \\
 \mu_l(T_s) &= \frac{\sum_{i=0}^4 n_i T_s^i}{\sum_{i=0}^3 o_i T_s^i}
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

Estas correlaciones están basadas en los modelos de Wulff et al. (1984a) y sólo algunos coeficientes fueron modificados/corregidos para mejor correlacionarse al estándar ASME-2000. En la siguiente figura A.1 se muestran algunas de estas correlaciones comparadas con el estándar. La desviación máxima encontrada es menor al 4%, la cual se encuentra dentro de la incertidumbre experimental.

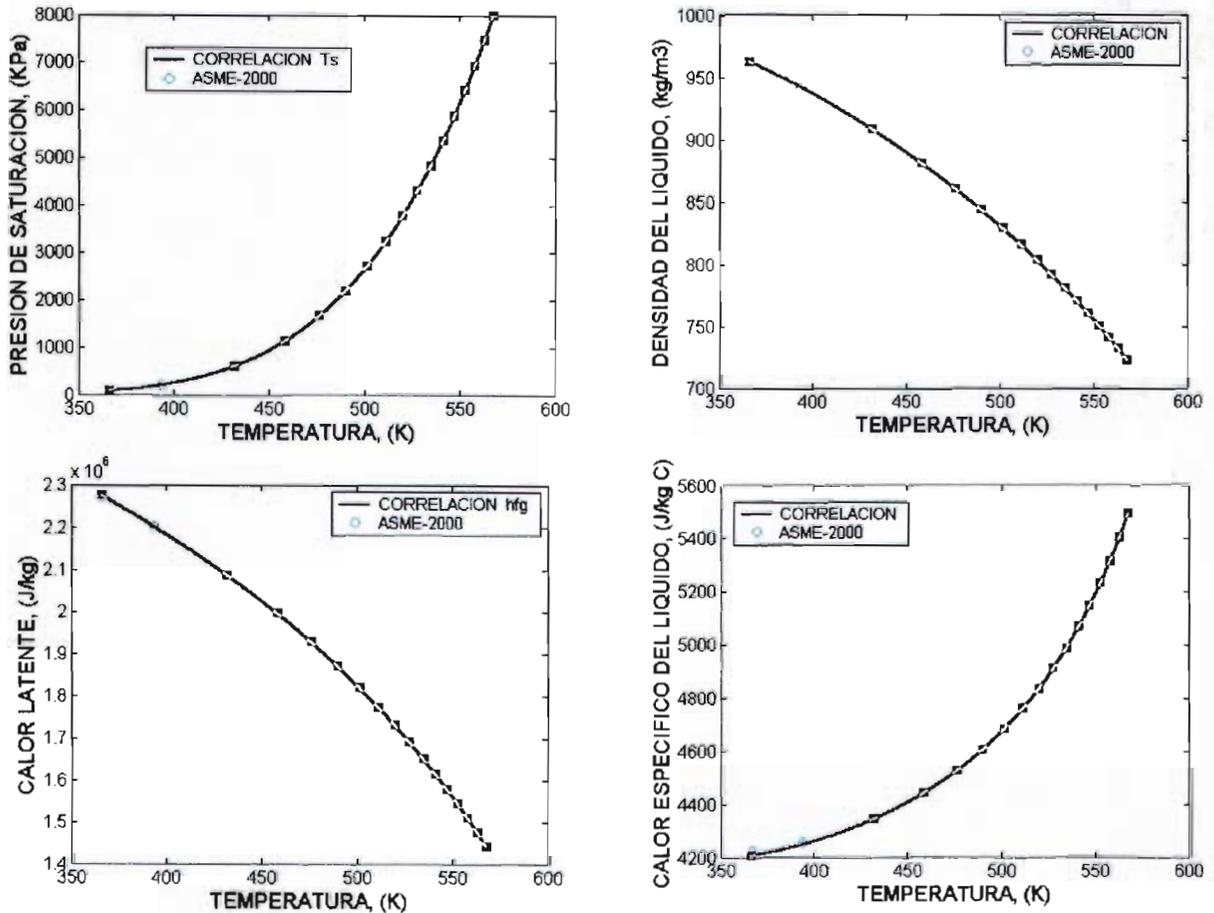


Figura A.1 Comparación de los perfiles obtenidos con las correlaciones y ASME.

En el directorio "propiedades de agua" del CDROM se encuentran las rutinas en donde se implementan estas correlaciones.

## **Apéndice B Acoplamiento de un modelo mecánico para simular sistemas pasivos de seguridad.**

Los sistemas pasivos de seguridad en la próxima generación de centrales nucleoelectricas han impuesto nuevos retos a los códigos más avanzados de la industria nuclear. Específicamente, en el modelado del sistema PCCS (Passive Containment Cooling System), se requiere la menor incertidumbre posible en la predicción del coeficiente de transferencia de calor. El sistema PCCS es un intercambiador de calor en donde se condensa vapor de agua en presencia de gases no condensables (NC).

En la tesis de Procopio (2000) se determinaron las capacidades predictivas de los códigos TRAC y RELAP5 para modelar el sistema PCCS con experimentos recientes. Los resultados mostraron que los valores numéricos de TRAC y RELAP5 están fuera del rango de incertidumbre experimental. Se propone utilizar uno de los modelos mecánicos que han sido propuestos para el diseño y/o soporte de PCCS. Estos modelos son: el modelo de la capa de difusión, el modelo de conductancia para la transferencia de masa y el modelo de Siddique (1992).

En el modelo mecánico de Siddique las ecuaciones de conservación para la capa límite de gases son usadas como base para definir los grupos adimensionales que intervienen en el proceso de condensación en presencia de gases NC. El modelo de Siddique se representa por la siguiente expresión:

$$\text{Nu}(z) = C \text{Re}^a \left( \frac{X_{\text{NC},w} - X_{\text{NC},b}}{X_{\text{NC},w}} \right)^b \text{Ja}^c \quad \text{B.1}$$

Donde Re es el número de Reynolds,  $X_{\text{NC},w}$  representa la fracción en masa del gas NC evaluada para la pared del tubo,  $X_{\text{NC},b}$  representa la fracción en masa del gas NC evaluada para la capa límite del gas no condensable y Ja es el número de Jakob.

Para utilizar el modelo de Siddique se deben calcular las constantes: C, a, b y c de su ecuación. Para determinar estos coeficientes se correlaciona el modelo de Siddique respecto a una base de datos de referencia (BDR). En esta BDR se resumen datos experimentales más recientes para evaluar el coeficiente de transferencia de calor del sistema PCCS. Aplicando logaritmos a la ecuación anterior:

$$\ln[\text{Nu}(z)] = \ln C + a \ln \text{Re} + b \ln \left( \frac{X_{\text{NC},w} - X_{\text{NC},b}}{X_{\text{NC},w}} \right) + c \ln \text{Ja} \quad \text{B.2}$$

La ecuación anterior muestra que, el número de Nusselt tiene una relación lineal con los números adimensionales en la forma:

$$Y = k_1 + k_2 X_1 + k_3 X_2 + k_4 X_3$$

donde:

$$k_1 = \ln C$$

$$k_2 = a$$

$$k_3 = b \quad y$$

$$k_4 = c$$

B.3

Aplicando una regresión lineal múltiple a la BDR se obtuvieron las constantes  $k_1, k_2, \dots, k_4$ . El resultado es el siguiente:

$$k_1 = -5.431$$

$$k_2 = 0.912$$

$$k_3 = -0.503$$

$$k_4 = -0.072$$

La concordancia del modelo de Siddique con datos experimentales tiene una desviación máxima de 11.78%.

El modelo mecanístico se puede acoplar a la PC2 mostrada en la figura 3.3. Las condiciones de frontera entre el RPV3D y el modelo mecanístico se presentan en la siguiente figura.

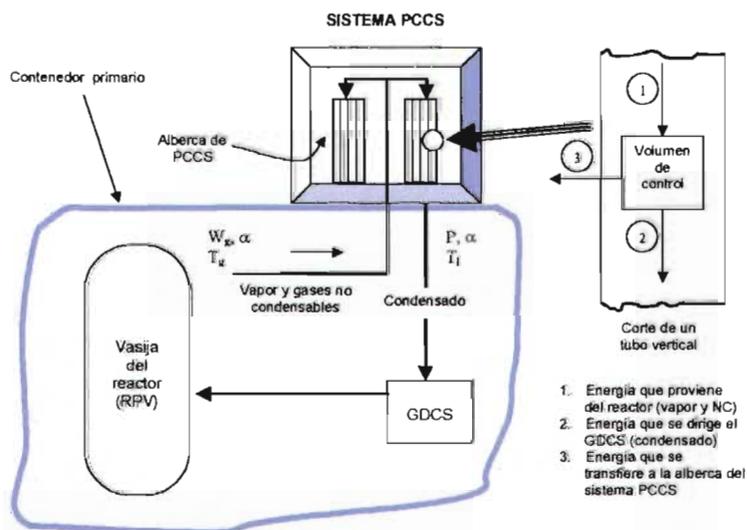


Figura B.1 Condiciones de frontera para el acoplamiento del sistema PCCS.

### **Apéndice C Interfaz de MATLAB con el S3D-BWR para monitorear variables de estado en “tiempo real de cálculo”**

La gran cantidad de variables que se evalúan en cada ejecución de los dos códigos es grande. Por cada ensamble de combustible se grafican y analizan las siguientes variables: perfiles de potencia, fracción de vacíos, temperatura del combustible y las variables de la termohidráulica como presión, temperatura y flujos de masa para la fase líquida y vapor. El análisis de toda esta base de datos es muy laborioso y consume gran cantidad de tiempo. Una forma de minimizar este análisis es mediante una interfaz para monitorear (en tiempo real de cálculo) las variables más importantes. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de esta Interfaz.

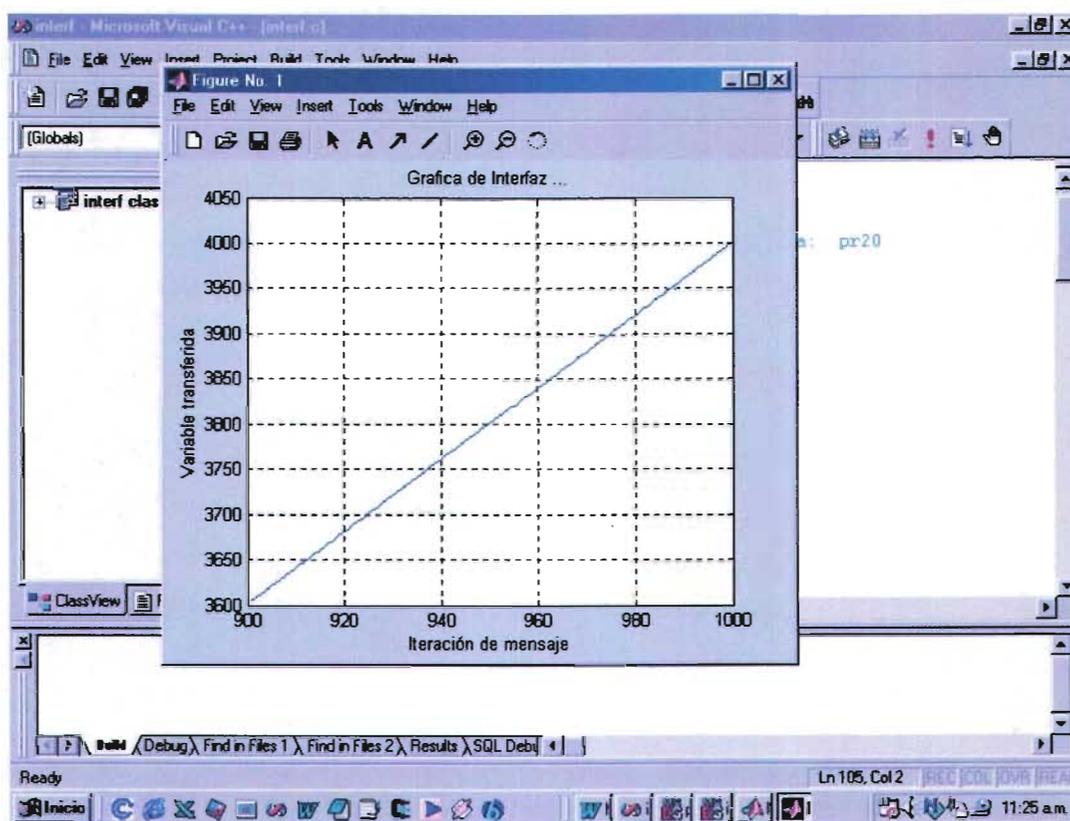


Figura C.1 Ejemplo de interfaz para monitorear variables y/o arreglos desde otra PC.

La interfaz tiene las siguientes características:

- Monitorea las variables elegidas desde las PCs en el que se están ejecutando los códigos de Ingeniería nuclear. Las variables, vectores y matrices se transfieren a través de una red de área local convencional y con las técnicas de programación paralela.

- La interfaz se ejecuta desde una PC con sistema operativo Windows 95/98/Me.
- El programa de interfaz utiliza las rutinas/funciones de MATLAB para graficar las variables en dos y tres dimensiones.

El siguiente código es un extracto de una versión de interfaz entre TRAC y MATLAB. Esta versión está escrita en visual C de Windows; el programa inicia MATLAB y posteriormente TRAC. El objetivo es transferir mensajes desde el componente BREAK de TRAC a MATLAB para graficación. El programa completo se encuentra en el directorio D:\PROGRAM\master del CDROM.

```

/* Programa maestro de la maquina virtual */

#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include "engine.h"

int main()

{
    Engine *ep;
    mxArray *TIEM=NULL, *VAR1=NULL;
    double i, a[1];

    int st, mytid, ta, info, q1, q2, i, n;
        float pvmtime, pvmtend, pvmp, pvmtin, pvmlp;
        float vart[20],varp[20], varte[20], vara[20];

    /****** Inicia MATLAB

    if ( !(ep = engOpen("\0")) ) {
        fprintf(stderr, "\nCan't start MATLAB
engine\n");
        return EXIT_FAILURE;
    }
    *****/

    /****** Inicia TRAC

    mytid=pvm_mytid();

    info=pvm_spawn("/home/trac/bf1/s_pvm03/trac_linux",0,1
        ,"maquina2",1,&ta);

    *****/

    /*
    * Recibe mensajes desde TRAC
    */

    info=pvm_recv( ta,1);
    info=pvm_upkfloat( &pvmtend, 1, 1);
    printf("Componente ID del BREAK...");
    scanf("%d",&q1);
    q2=1;

```

```

/*
 *      Envía mensajes a TRAC
 */

    info=pvm_initsend(0);
    info=pvm_pkint(&q1, 1, 1);
    info=pvm_pkint(&q2, 1, 1);
    info=pvm_send(ta, 1);

    a[0]=0;
    for (i=1; i<4; i+=0.5) {
        printf("%g \n",a[0]);

/*
 *      Crea variables de interfaz
 */

    TIEM = mxCreateDoubleMatrix(1, 1, mxREAL);
    MxSetName(TIEM, "t");
    MxMemcpy((void *)mxGetPr(TIEM), (void *)a, sizeof(a));

    VAR1 = mxCreateDoubleMatrix(1, 1, mxREAL);
    MxSetName(VAR1, "v1");
    MxMemcpy((void *)mxGetPr(VAR1), (void *)a, sizeof(a));

    engPutArray(ep, TIEM);
    engPutArray(ep, VAR1);

/*
 *      Grafica variables....
 */

    if ( i==1.0 )
    {
        printf("Pasaaaaa ??\n");
        engEvalString(ep, "c1=0;");
    }
    engEvalString(ep, "x(c1+1)=t(1); y(c1+1)=v1(1)");
    engEvalString(ep, "plot(x,y+1);");
    engEvalString(ep, "title('Position vs. Time for a
falling object');");
    engEvalString(ep, "xlabel('Time (seconds)');");
    engEvalString(ep, "ylabel('Position (meters)');");
    engEvalString(ep, "c1=c1+1;");

    a[0]=a[0]+10;

    }

    printf(" OK !\n");
    engClose(ep);

    return EXIT_SUCCESS;
}

```

## **Apéndice D Archivos de entrada “INPUTS” para el S3D-BWR**

El procedimiento para simular un caso con el simulador S3D-BWR es el siguiente:

1. Generar un archivo “normal” de entrada (input) para RAMONA.
2. Generar un archivo “normal” de entrada (input) para TRAC.

Estos archivos deben modelar la misma planta y tener las siguientes características:

1. Condiciones geométricas semejantes o idénticas (cuando sea posible).
2. Condiciones de frontera semejantes o idénticas (cuando sea posible).
3. Condiciones iniciales semejantes o idénticas (cuando sea posible).
4. Utilizar un tamaño de paso de integración conservador para la neutrónica y termohidráulica (utilizar el criterio de Courant para determinar el tamaño de paso de integración y evitar problemas de inconsistencia numérica en ambos códigos).

Los siguientes archivos fueron utilizados para verificar el acoplamiento de RAMONA y TRAC. Estos archivos tienen un tamaño considerable; con una extensión de por lo menos 10 hojas por cada archivo. Por comodidad se prefiere proporcionar estos archivos en el CDROM (véase el directorio “input del S3D-BWR.2”).

Tabla D.1 Archivo de entrada “input” para el modelo TH3D.

Tabla D.2 Archivo de entrada “input” para el modelo N3D.

Tabla D.3 Archivo de entrada “input” para el modelo RPV3D.

Directorio en el CDROM:

D:\input\th3d.inp

D:\input\n3d.inp

D:\input\rvp3d.inp

## **Referencias**

- Alloggio G, D. Basile, E. Brega, R. Guandalini and L. Pollachini, Simulation of PWR Plant by a New Version of TRAC-PF1 Code including a Three-Dimensional Neutronic Model and a Transport Boron Model, Proceedings of the ASME-JSME 4th Int. Conf. on Nucl. Eng, 1996.
- Asaka H., V. Zimin, T. Iguchi, S. Ohmizu and Y. Anoda, (2000). Coupling of the Thermal-Hydraulic TRAC Codes with 3D Neutron Kinetics Code SKETCH-N, Proc. of the OECD/CSNI Workshop on Advanced Thermal-Hydraulic and Neutronics, Barcelona Spain, April 2000.
- Atul Karve, Rizwan uddin, J. Dornig, 1997. Stability analysis of BWR nuclear-coupled thermal-hydraulics using a simple model, Nuclear Engineering and Design 177, 155-177.
- Akitoshi Hotta, Ninokata Hissashi and Baratta Anthony, 2000. Development of Parallel Coupling System between Three-Dimensional Nodal Kinetic Code ENTREE and Two-Fluid Plant Simulator TRAC-BF1, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY 37.
- Basile D., E. Salina and E. Brega, TRAC-PF1-EN/MOD3: A TRAC-PF1 Revised Version Inclusive of a Three-Dimensional Neutron Kinetics Model based on High-Accuracy Two-Group Nodal Diffusion Methods (ENEL-ATN/GNUM) Rep. No. 1037/3, Feb. 1997.
- Birol Aktas, 2003. LEVEL TRACKING IN THERMAL-HYDRAULIC SIMULATIONS OF NUCLEAR REACTORS, A PhD Thesis in Nuclear Engineering, Pennsylvania State University
- Borkowski J.A. and Wade N.L., Eds., 1992. TRAC-BF1/MOD1: An advanced Best-Estimate computer program for BWR accident analysis, NUREG/CR-4356, EGG-2626
- Chexal B., Lellouche G., Horowitz J., Healzer J. and Oh S., 1991. The Chexal-Lellouche Void Fraction Correlation for Generalized Applications, Nuclear Safety Analysis Center of the Electric Power Research Institute (NSAC-139)
- Coddington P. and Macian R., 2002. A study of the performance of void fraction correlations used in the context of drift-flux two-phase flow models, Nuclear Engineering and Design 215, p.199-216.
- Delhaye J. M., Giot M. And Riethmuller M. L., 1981. Thermohydraulics of Two-Phase System for Industrial Design and Nuclear Engineering, McGraw-Hill Book Company.
- Forschungszentrum K., Cacuci D., "Innovative Features In The RELAP5/Panbox/COBRA Neutron kinetics / Thermal-Hydraulics Code System" 8th International Conference on Nuclear Engineering, Baltimore MD USA, April 2-6, 2000.
- Gandrille J., Haulbert A. and Petetrot J., "MANTA A MODULAR ADVANCED NEUTRONIC AND THERMALHYDRAULIC ANALYSIS CODE" 8th International Conference on Nuclear Engineering, Baltimore MD USA, April 2-6, 2000.
- Geist A., Beguelin A., Dongarra J., 1994. PVM 3 USER'S GUIDE AND REFERENCE MANUAL, Oak Ridge National Laboratory (ORNL/TM-12187).

- Gougar Hans David, 2004. ADVANCED CORE DESIGN AND FUEL MANAGEMENT FOR PEBBLE-BED REACTORS, A PhD Thesis in Nuclear Engineering, Pennsylvania State University
- Langenbuch S., Velkov K., Kliem S., Rohde U., Lizorkin M., Hegyi G. and Kereszturi A., "Development of coupled systems of 3D neutronics and fluid-dynamic system codes and their application for safety analysis", International benchmark activities for code comparison OECD/CSNI PWR, 2000
- Magwood, W., 2000, "Roadmap to the Next Generation Nuclear Power Systems: A Vision for a Powerful Future," Nuclear News, American Nuclear Society, November 2000.
- Mahaffy J., Uhle J., Dearing J., Downar T. and Johns R., "Architecture of the USNRC Consolidated Code", 8th International Conference on Nuclear Engineering, Baltimore MD USA, April 2-6, 2000a.
- Mahaffy J., Downar T. and Wang Q., "Solution of Flow Equations in the USNRC Consolidated Code", International Meeting on "Best Estimate" methods in Nuclear Installation Safety Analysis (BE-2000), Washington USA, 2000b.
- Mahaffy J. and Uhle J., "Distributed/Parallel Reactor Simulations Using the USNRC Consolidated Code", International Meeting on "Best Estimate" methods in Nuclear Installation Safety Analysis (BE-2000), Washington USA, 2000c.
- MATLAB, 2000. Application Program Interface Reference, The MathWorks Inc.
- Mittag S., Kliem S., Weiss P., Kyrki-Rajamäki R., Hämäläinen A., Langenbuch S., Danilin S., Hadek J., Hegyi G., Kuchin A. and Panayotov D., "Validation of Coupled Neutron-Kinetic / Thermal Hydraulic Codes for VVER", CSNI Workshop on Advanced TH/Neutronics Codes, Barcelona (Spain), April 10-13, 2000
- Moustafa Abouziarov, Jaime Morales, Ricardo Villegas, "Numerical Analysis and improvements to the RAMONA-3B code for real time applications, VIII congreso de la SNM, Guanajuato México, 1997.
- Nadejda Todorova and Kostadin Ivanov, "PWR REA Sensitivity Analysis of TRAC-PPF1/NEM Coupling Schemes", NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR ENGINEERING, Nice France, 2001
- NERI, 2003. Nuclear Energy Research Initiative (NERI), 2003 Annual Report, U.S. Department of Energy, DOENE-0125.
- OECD Nuclear Energy Agency, 2000. CSNI International Standard Problems (ISP), Brief Descriptions (1975-1999), NEA/CSNI/R
- Petrie L.M. and N.F. Lansers, "KENO5A - An improved Monte Carlo Critically Program with Supergrouping" Volume 2, NUREG/CR-0200 Rev. 2 (ORNL/NUREG/CSD-2/R2), December 1984.
- Procopio A., 2000. Evaluación de modelos termohidráulicos para el análisis de condensadores de vapor con gases no condensables, Tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), México.
- Ramon J. and J. Pena, Parallelization of KENO-Va at the CSN, Nuclear Energy Agency, NEA-1467/01, October 1994.
- RAMONA-3 User's Manual, FMS, ScandPower, 1995.

- Rao A.S, 1994. "SBWR – Simple, proven and economic technology for the future", ENC-94, Lyon, France
- Siddique M., 1992. The effects of noncondensable gases on steam condensation under forced convection conditions, PhD Dissertation, Massachusetts Institute of Technology
- Solis J., Avramova M., Ivanov K., 2002. Temporal adaptive algorithm for TRAC-BF1/NEM/COBRA-TF coupled calculations in BWR safety analysis, *Annals of Nuclear Energy* 29, 2127-2141.
- Toumi I., Bergeron A., Gallo D., Royer E. and Caruge D., 2000. FLICA-4: a three-dimensional two-phase flow computer code with advanced numerical methods for nuclear applications, *Nuclear Engineering and Design* 200, 139-155.
- Upton H.A., Torbeck J.A., Billig P.F., Duncan J.D. and Herzog M., 1996. "SBWR design update: passively safe, Nuclear Power Generation for the Twenty First Century", ICONE 4, New Orleans, USA.
- Weaver W., Tomlinson E. and Aumiller D., 2002. A generic semi-implicit coupling methodology for use in RELAP5-3D, *Nuclear Engineering and Design* 211, 13-26.
- Wulff W., Cheng H. S., Lekach S. V., and Mallen A. N., 1984a. THE BNL PLANT ANALYZER, Brookhaven National Laboratory Upton BNL-NUREG-51812
- Wulff W., et. al, 1984b. A Description and Assessment of RAMONA-3B Mod 0, A Computer Code With 3D Neutron Kinetics for BWR System Transients, Brookhaven National Laboratory, BNL-NUREG-51784
- Zimin, V.G. and H. Ninokata, Nodal Neutron Kinetics Code for LWR Analysis, Nuclear Energy Agency NEA-1577, March 1998a.
- Zimin, V.G., Ninokata, H., Pogosbekyan L., (1998). Polynomial and Semi-Analytic Nodal Methods for Nonlinear Iteration Procedure, Proc. of the Int. Conf. on the Physics of Nuclear Science and Technology (PHYSOR), October, 1998b.