

Acoplamiento multiescala en cálculos fluidodinámicos

Director

Dr. Dari, Enzo Alberto

Maestrando

Ing. Caccia, Federico Agustín

26 de septiembre de 2017



Comisión Nacional
de Energía Atómica



Instituto
Balseiro

Outline

1 Introducción

Outline

- 1 Introducción
- 2 Estrategia de resolución

Outline

- 1 Introducción
- 2 Estrategia de resolución
- 3 Ejemplos de aplicación

Outline

- 1 Introducción
- 2 Estrategia de resolución
- 3 Ejemplos de aplicación
- 4 Conclusiones

1 Introducción

Introducción

Motivación

- Estudios de sistemas con múltiples componentes.
- Reducción del costo computacional.



Figura 1: Esquema del circuito de deuterio en una fuente fría de neutrones.

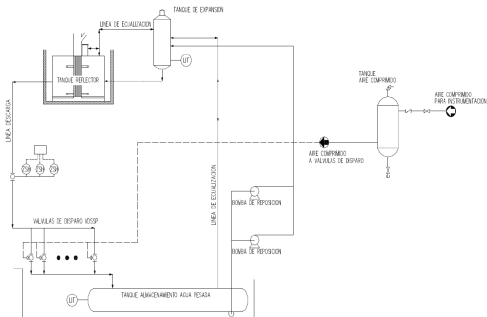
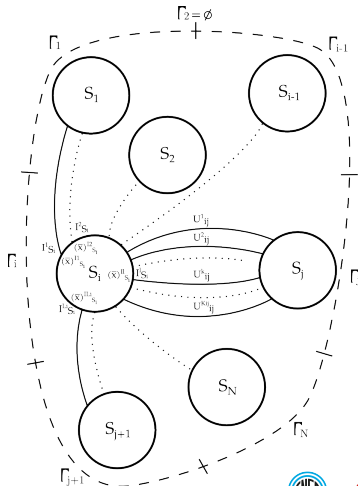


Figura 2: Esquema del Segundo Sistema de Parada del reactor RA-10.

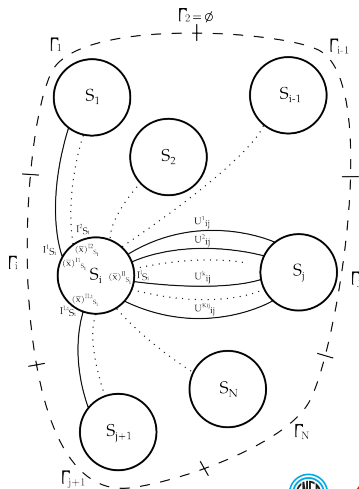
1 Introducción

Abordaje del modelado



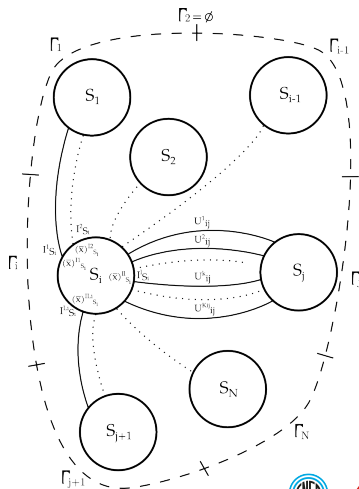
Abordaje del modelado

- Desglosar en subsistemas



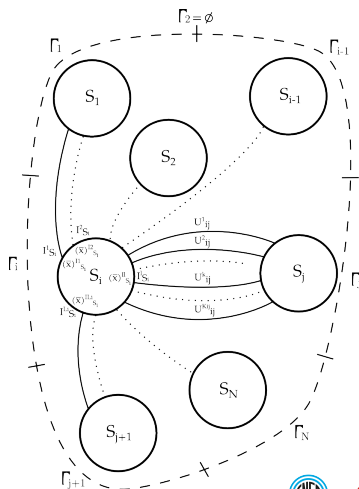
Abordaje del modelado

- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento



Abordaje del modelado

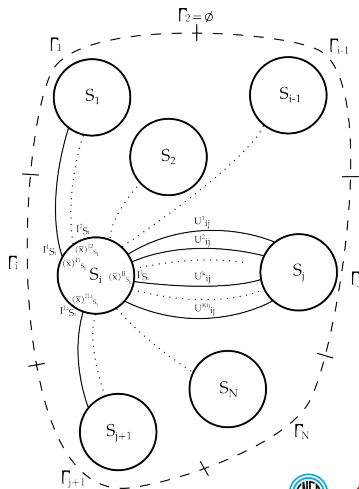
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz



Introducción

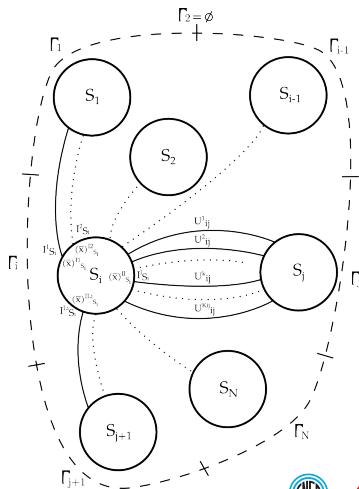
Abordaje del modelado

- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz
- Total de incógnitas: $2N$



Abordaje del modelado

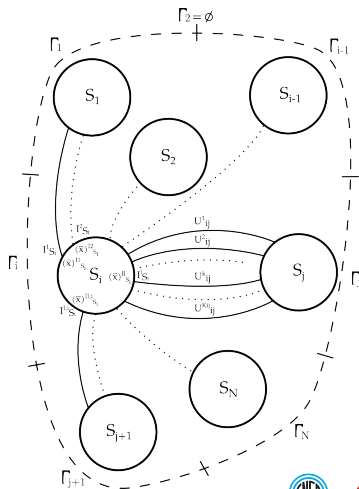
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz
- Total de incógnitas: $2N$
 - N ecuaciones de continuidad que relacionan las incógnitas entre dos interfaces contiguas de distintos subsistemas



Introducción

Abordaje del modelado

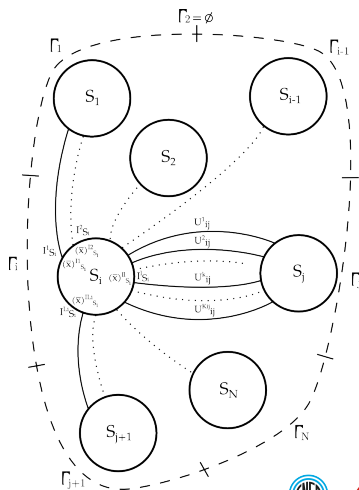
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz
- Total de incógnitas: $2N$
 - N ecuaciones de continuidad que relacionan las incógnitas entre dos interfaces contiguas de distintos subsistemas
 - N ecuaciones modelos (acopladas) que relacionan las incógnitas (según selección de condiciones de borde)



Introducción

Abordaje del modelado

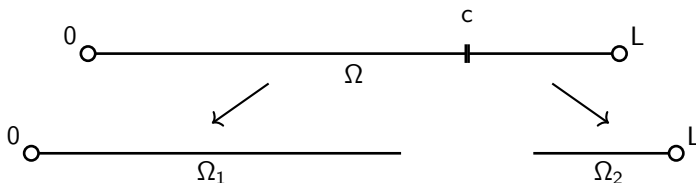
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz
- Total de incógnitas: $2N$
 - N ecuaciones de continuidad que relacionan las incógnitas entre dos interfaces contiguas de distintos subsistemas
 - N ecuaciones modelos (acopladas) que relacionan las incógnitas (según selección de condiciones de borde)
- Seleccionar método numérico y resolver con acoplamiento fuerte



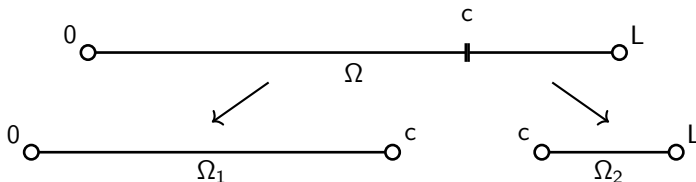
Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo

- 1. Descomponer el dominio



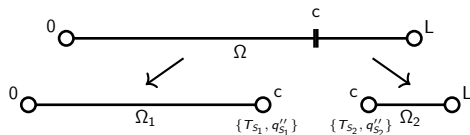
Abordaje del modelado: Ejemplo



Abordaje del modelado: Ejemplo

-

Abordaje del modelado: Ejemplo

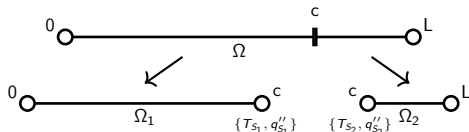


- 4. Ecuaciones de continuidad:

$$\begin{cases} T_{S_1} = T_{S_2} = T \\ q''_{S_1} = q''_{S_2} = q'' \end{cases}$$

Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo

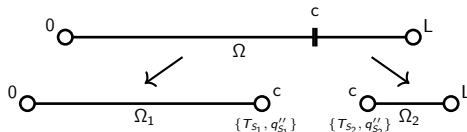


- 5. Ecuaciones modelos según condiciones de borde:
 - a. Selección de condiciones de borde:
 - S_1 condición de tipo *Dirichlet* (recibe T^{guess})
 - S_2 condición de tipo *Neumann* (recibe q''^{guess})
 - b. Selección de ecuaciones modelos:

$$\begin{cases} (q''^{calc})_{S_1} = \mathcal{N}_1((T^{guess})_{S_1}) \\ (T^{calc})_{S_2} = \mathcal{D}_2((q''^{guess})_{S_2}) \end{cases}$$

Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo

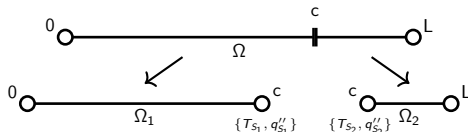


- 6. Seleccionar método numérico y resolver:
 - a. Métodos explícitos:
 - a1. *Dirichlet – to – Neumann* (cálculos en serie):

$$\begin{cases} (q''^{calc})_{s_1} = \mathcal{N}_1((T^{guess})_{s_1}) \\ (T^{calc})_{s_2} = \mathcal{D}_2((q''^{calc})_{s_1}) \end{cases}$$

Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo

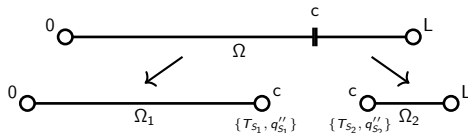


- 6. Seleccionar método numérico y resolver:
 - a. Métodos explícitos:
 - a2. *Punto fijo* (cálculos en paralelo):

$$\begin{cases} (q''^{calc})_{s_1} = \mathcal{N}_1((T^{guess})_{s_1}) \\ (T^{calc})_{s_2} = \mathcal{D}_2((q''^{guess})_{s_2}) \end{cases}$$

Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo



- 6. Seleccionar método numérico y resolver:
 - a. Métodos implícitos (cálculos en paralelo): Búsqueda de raíces de las ecuaciones de residuos:

$$\begin{cases} (r_{q''})_{s_1}^1 = (q''^{guess}) - (q''^{calc})_{s_1} \\ (r_{q''})_{s_2}^1 = (T^{guess}) - (T^{calc})_{s_2} \end{cases}$$

- a1. *Newton – Raphson*
- a2. *Quasi – Newton*
- a3. *Newton – Krylov*

Introducción

Abordaje del modelado

Cuadro 1: Principales características de los métodos utilizados

	Métodos explícitos	Métodos implícitos
Ventajas	Fácil implementación	Implementación compleja
Desventajas	Selección de condiciones de borde limitada En general convergencia más lenta	Libertad en selección de condiciones de borde En general mejores propiedades de convergencia

Problemas de evolución

Estrategia:



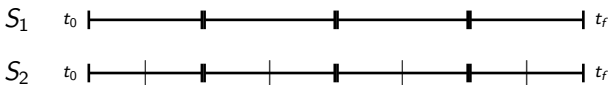
Problemas de evolución

- Cada sistema utiliza su propia discretización temporal.



Problemas de evolución

- Cada sistema utiliza su propia discretización temporal.
- La discretización debe coincidir al comienzo (condiciones iniciales), al final y en puntos a lo largo de la evolución.
- Los resultados se acoplan en estos puntos de coincidencia.
- Usando métodos iterativos, cada iteración comienza la resolución desde el último punto acoplado (en el que convergieron los resultados).



Outline

1 Introducción

- Motivación
- Abordaje del modelado
- **Objetivos**

2 Estrategia de resolución

- Paradigma maestro-esclavo
- Modelos de comunicación
- Arquitectura de acoplamiento montada en códigos esclavos comunicados por paso de mensajes
- Códigos maestro utilizados

3 Ejemplos de aplicación

- Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
- Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
- Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes
- Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

4 Conclusiones

Introducción

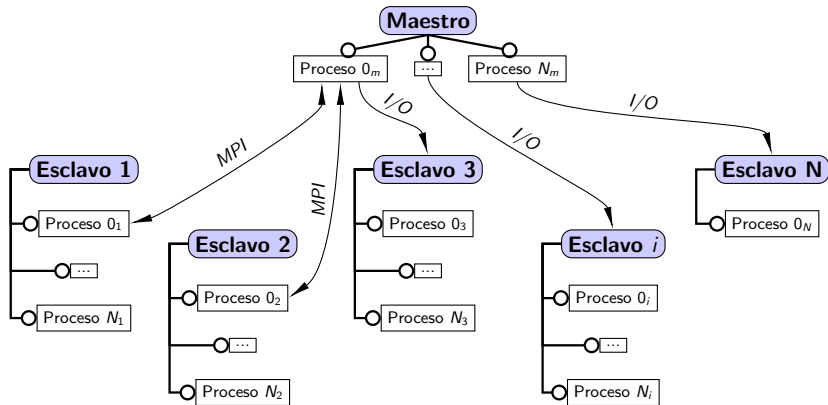
Objetivos

Considerando la motivación y la formulación precedente, queda establecido el siguiente objetivo general de la maestría:

Desarrollar una estrategia de resolución de problemas complejos formulados mediante el Método de Descomposición Disjunta de Dominios que permita resolver subproblemas separados con códigos de cálculo específicos, manteniendo la interacción entre ellos solo mediante condiciones de borde.

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Paradigma maestro-esclavo



Outline

- Motivación
- Abordaje del modelado
- Objetivos

2 Estrategia de resolución

- Paradigma maestro-esclavo
- **Modelos de comunicación**
- Arquitectura de acoplamiento montada en códigos esclavos comunicados por paso de mensajes
- Códigos maestro utilizados

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Modelos de comunicación

- Paso de mensajes: este modelo es implementado para comunicar procesos de programas en los cuales es posible modificar sus códigos fuente.
 - Programas ejecutados en forma independiente y conectados
 - Programas ejecutados en simultáneo como argumentos de *mpirun*

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Modelos de comunicación

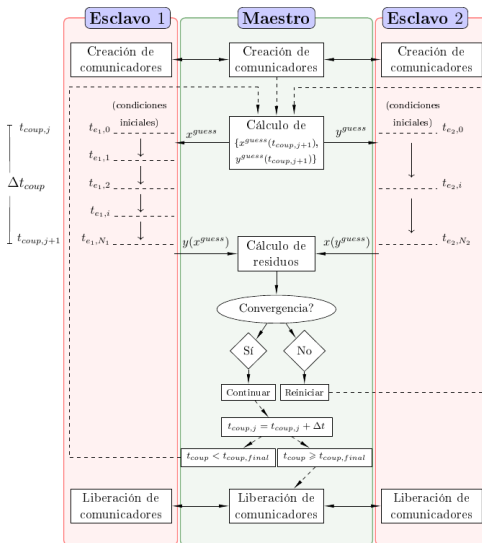
- Paso de mensajes: este modelo es implementado para comunicar procesos de programas en los cuales es posible modificar sus códigos fuente.
 - Programas ejecutados en forma independiente y conectados
 - Programas ejecutados en simultáneo como argumentos de *mpirun*
- Escritura de archivos de entrada y lectura de archivos de salida: este modelo es implementado para comunicar procesos de programas en los cuales NO es posible modificar sus códigos fuente.

Outline

- 1 Introducción
 - Motivación
 - Abordaje del modelado
 - Objetivos
- 2 Estrategia de resolución
 - Paradigma maestro-esclavo
 - Modelos de comunicación
 - Arquitectura de acoplamiento montada en códigos esclavos comunicados por paso de mensajes
 - Códigos maestro utilizados
- 3 Ejemplos de aplicación
 - Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
 - Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
 - Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes
 - Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo
- 4 Conclusiones

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Arquitectura de acoplamiento montada en códigos esclavos comunicados por paso de mensajes



Outline

- 1 **Introducción**
 - Motivación
 - Abordaje del modelado
 - Objetivos
- 2 **Estrategia de resolución**
 - Paradigma maestro-esclavo
 - Modelos de comunicación
 - Arquitectura de acoplamiento montada en códigos esclavos comunicados por paso de mensajes
 - **Códigos maestro utilizados**
- 3 **Ejemplos de aplicación**
 - Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
 - Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
 - Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes
 - Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo
- 4 **Conclusiones**

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Códigos maestro utilizados

- **Coupling** ref
 - Modelos de comunicación por paso de mensajes entre programas ejecutados de manera independiente

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Códigos maestro utilizados

- **Coupling** ref

- Modelos de comunicación por paso de mensajes entre programas ejecutados de manera independiente
- Cada interfaz de acople tiene N pares de variables incógnitas

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Códigos maestro utilizados

• **Coupling** ref

- Modelos de comunicación por paso de mensajes entre programas ejecutados de manera independiente
- Cada interfaz de acople tiene N pares de variables incógnitas
- Métodos de resolución explícitos e implícitos implementados

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Códigos maestro utilizados

- **Newton** (desarrollado durante la maestría)
 - Modelos de comunicación por paso de mensajes entre programas ejecutados de manera independiente o simultánea

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Códigos maestro utilizados

- **Newton** (desarrollado durante la maestría)
 - Modelos de comunicación por paso de mensajes entre programas ejecutados de manera independiente o simultánea
 - Modelos de comunicación por manejo de archivos

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Códigos maestro utilizados

- **Newton** (desarrollado durante la maestría)
 - Modelos de comunicación por paso de mensajes entre programas ejecutados de manera independiente o simultánea
 - Modelos de comunicación por manejo de archivos
 - Cada subsistema tiene N incógnitas (extensión a acoplamientos genéricos)

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

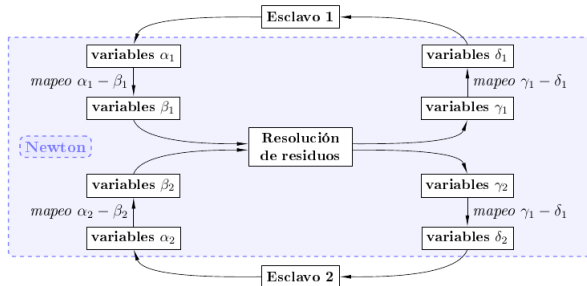
Códigos maestro utilizados

- **Newton** (desarrollado durante la maestría)
 - Modelos de comunicación por paso de mensajes entre programas ejecutados de manera independiente o simultánea
 - Modelos de comunicación por manejo de archivos
 - Cada subsistema tiene N incógnitas (extensión a acoplamientos genéricos)
 - Métodos de resolución explícitos e implícitos implementados

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Códigos maestro utilizados

- **Newton** (desarrollado durante la maestría)
 - Modelos de comunicación por paso de mensajes entre programas ejecutados de manera independiente o simultánea
 - Modelos de comunicación por manejo de archivos
 - Cada subsistema tiene N incógnitas (extensión a acoplamientos genéricos)
 - Métodos de resolución explícitos e implícitos implementados
 - Mapeos de variables de entrada y salida ($\alpha - \beta$ y $\gamma - \delta$)

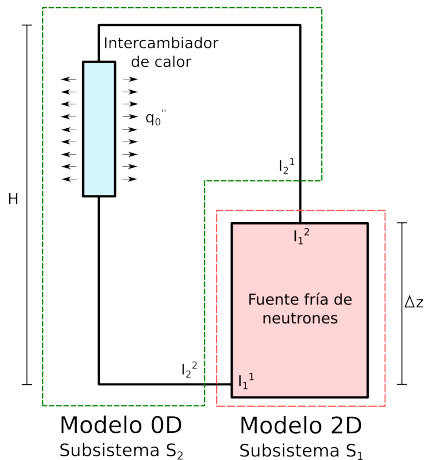


Outline

- 1 Introducción
 - Motivación
 - Abordaje del modelado
 - Objetivos
- 2 Estrategia de resolución
 - Paradigma maestro-esclavo
 - Modelos de comunicación
 - Arquitectura de acoplamiento montada en códigos esclavos comunicados por paso de mensajes
 - Códigos maestro utilizados
- 3 Ejemplos de aplicación
 - **Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado**
 - Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
 - Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes
 - Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo
- 4 Conclusiones

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones



Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_1 :

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_1 :

Parámetros utilizados: $\rho_0 = 163 \text{ Kg}/m^3$ a la temperatura de referencia

T_{ref} , $\mu = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ Kg}/ms$, $c_p = 6333,6 \text{ J}/KgK$, $k = 0,136 \text{ W}/mK$ y

$\beta = 1,32 \cdot 10^{-2} K^{-1}$. Las áreas de las interfaces de acople son

$A_1^1 = A_2^2 = 0,03 \text{ m}^2$.

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_1 :

Parámetros utilizados: $\rho_0 = 163 \text{ Kg}/\text{m}^3$ a la temperatura de referencia T_{ref} , $\mu = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ Kg}/\text{ms}$, $c_p = 6333,6 \text{ J}/\text{KgK}$, $k = 0,136 \text{ W}/\text{mK}$ y $\beta = 1,32 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$. Las áreas de las interfaces de acople son $A_1^1 = A_2^2 = 0,03 \text{ m}^2$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\frac{\nabla p}{\rho_0} + (1 - \beta(T - T_{ref})) \bar{g} + \\ + \nabla \cdot [(\nu) (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T)] \\ \nabla \cdot \bar{u} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) T = \frac{k}{\rho_0 c_p} \Delta T + \frac{f_0}{\rho_0 c_p} \end{array} \right.$$

donde \bar{u} es el campo de velocidades dentro de la cavidad, p el campo de presiones y T el campo de temperaturas.

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_2 :

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_2 :

Parámetros extra utilizados: longitud total de cañerías $L = 15 \text{ m}$,
 sumatoria de coeficientes de pérdida de carga concentrada $\sum K_i = 1,72$,
 rugosidad de cañerías $\epsilon = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_2 :

Parámetros extra utilizados: longitud total de cañerías $L = 15 \text{ m}$,
sumatoria de coeficientes de pérdida de carga concentrada $\sum K_i = 1,72$,
rugosidad de cañerías $\epsilon = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

$$\begin{cases} Q_2^2 = Q_1^2 \\ p_2^2 = p_1^2 + \rho_0 g (\Delta z + \beta(T_2^1 - T_{ref})(H - \Delta z)) - \\ - \rho_0 \frac{1}{2} \left(\frac{Q_1^1}{A_2^1} \right)^2 \left(\frac{f_D L}{D} + \sum_i K_i \right) \\ T_2^2 = 0 \end{cases}$$

donde Q_2^i es el caudal en la interfaz i , p_2^i es la presión del subsistema promediada en esta interfaz, T_2^i es la temperatura promediada en esta interfaz, g es la aceleración generada por el campo gravitatorio, f_D es el factor de Darcy de pérdida de carga distribuida, y D es el diámetro de la tubería.

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Estrategia de resolución:

- Ecuaciones de continuidad

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_1^1 = Q_2^2 \\ Q_1^2 = Q_2^1 \\ p_1^1 = p_2^2 \\ p_1^2 = p_2^1 \\ T_2^1 = T_2^2 \\ T_2^2 = T_2^1 \\ q''^1_2 = -q''^2_2 \\ q''^2_2 = -q''^1_2 \end{array} \right.$$

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

- Selección de condiciones de borde
 - en la interfaz inferior de la cavidad 2-D:
 - condiciones de tipo *Dirichlet* para el par presión-caudal
 - condiciones de tipo *Dirichlet* para el par temperatura-flujo de calor
 - en la interfaz superior de la cavidad 2-D:
 - condiciones de tipo *Neumann* para el par presión-caudal
 - condiciones de tipo *Neumann* para el par temperatura-flujo de calor

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

- Selección de condiciones de borde
 - en la interfaz inferior de la cavidad 2-D:
 - condiciones de tipo *Dirichlet* para el par presión-caudal
 - condiciones de tipo *Dirichlet* para el par temperatura-flujo de calor
 - en la interfaz superior de la cavidad 2-D:
 - condiciones de tipo *Neumann* para el par presión-caudal
 - condiciones de tipo *Neumann* para el par temperatura-flujo de calor
 - en la interfaz inferior de la red 0-D:
 - condiciones de tipo *Neumann* para el par presión-caudal
 - condiciones de tipo *Neumann* para el par temperatura-flujo de calor
 - en la interfaz superior de la red 0-D:
 - condiciones de tipo *Neumann* para el par presión-caudal
 - condiciones de tipo *Dirichlet* para el par temperatura-flujo de calor

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

- Ecuaciones de residuos en subsistema 1:

$$\begin{cases} (R_{p,Q})_1^1 = p_1^{1,guess} - p_1^{1,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{''2,guess}) \\ (R_{T,q''})_1^1 = q_1^{''1,guess} - q_1^{''1,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{''2,guess}) \\ (R_{p,Q})_1^2 = Q_1^{2,guess} - Q_1^{2,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{''2,guess}) \\ (R_{T,q''})_1^2 = T_1^{2,guess} - T_1^{2,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{''2,guess}) \end{cases}$$

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

- Ecuaciones de residuos en subsistema 1:

$$\begin{cases} (R_{p,Q})_1^1 = p_1^{1,guess} - p_1^{1,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{''2,guess}) \\ (R_{T,q''})_1^1 = q_1^{''1,guess} - q_1^{''1,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{''2,guess}) \\ (R_{p,Q})_1^2 = Q_1^{2,guess} - Q_1^{2,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{''2,guess}) \\ (R_{T,q''})_1^2 = T_1^{2,guess} - T_1^{2,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{''2,guess}) \end{cases}$$

- Ecuaciones de residuos en subsistema 2:

$$\begin{cases} (R_{p,Q})_2^1 = Q_2^{1,guess} - Q_2^{1,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{''2,guess}) \\ (R_{T,q''})_2^1 = q_2^{''1,guess} - q_2^{''1,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{''2,guess}) \\ (R_{p,Q})_2^2 = Q_2^{2,guess} - Q_2^{2,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{''2,guess}) \\ (R_{T,q''})_2^2 = T_2^{2,guess} - T_2^{2,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{''2,guess}) \end{cases}$$

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

- Ecuaciones de residuos en subsistema 1: (fijo $p_1^2 = p_{ref} = 0$)

$$\begin{cases} (R_{p,Q})_1^1 = p_1^{1,guess} - p_1^{1,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{1/2,guess}) \\ (R_{T,q''})_1^1 = q_1^{1/1,guess} - q_1^{1/1,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{1/2,guess}) \\ (R_{p,Q})_1^2 = Q_1^{2,guess} - Q_1^{2,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{1/2,guess}) \\ (R_{T,q''})_1^2 = T_1^{2,guess} - T_1^{2,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{1/2,guess}) \end{cases}$$

- Ecuaciones de residuos en subsistema 2: (fijo $p_2^1 = p_{ref} = 0$)

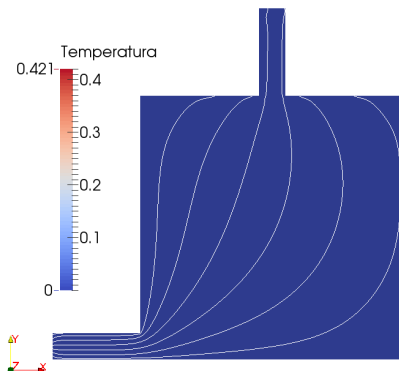
$$\begin{cases} (R_{p,Q})_2^1 = Q_2^{1,guess} - Q_2^{1,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{1/2,guess}) \\ (R_{T,q''})_2^1 = q_2^{1/1,guess} - q_2^{1/1,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{1/2,guess}) \\ (R_{p,Q})_2^2 = Q_2^{2,guess} - Q_2^{2,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{1/2,guess}) \\ (R_{T,q''})_2^2 = T_2^{2,guess} - T_2^{2,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{1/2,guess}) \end{cases}$$

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Distintos comportamientos según el Ri obtenido:

- $Ri = 84$:



Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

A mayor altura H del intercambiador de calor, mayor caudal obtenido:

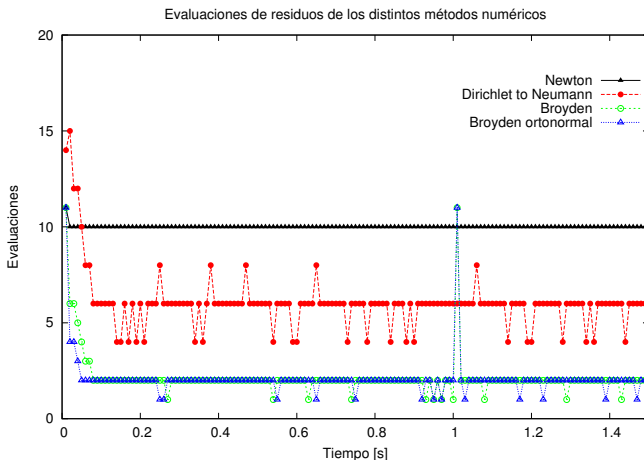
$f_0 [W/m^3]$	$H/\Delta z$	Ri	$\Delta T [K]$	$Q[m^3/s]$	$\Delta p [Pa]$
$2 \cdot 10^4$	1	3.4	0.7	$3,2 \cdot 10^{-3}$	613
	5	1	0.5	$4,2 \cdot 10^{-3}$	614
	10	0.5	0.3	$4,5 \cdot 10^{-3}$	617
$2 \cdot 10^5$	1	6.5	3.6	$4,4 \cdot 10^{-3}$	595
	5	1.7	2.8	$7,6 \cdot 10^{-3}$	605
	10	0.9	2.2	$9,0 \cdot 10^{-3}$	620
$2 \cdot 10^6$	1	10.6	24	$8,9 \cdot 10^{-3}$	465
	5	2.2	18	$1,7 \cdot 10^{-2}$	580
	10	0.9	11.6	$2,1 \cdot 10^{-2}$	700

Cuadro 2: Principales resultados del cálculo para el análisis de la fuente fría variando la magnitud de la fuente interna y la altura del sistema de enfriamiento.

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Análisis de métodos de resolución del sistema de ecuaciones de residuos:



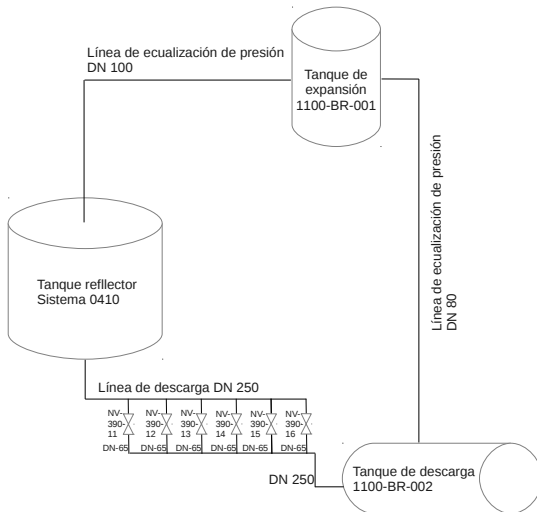
Outline

- 1 Introducción
 - Motivación
 - Abordaje del modelado
 - Objetivos
- 2 Estrategia de resolución
 - Paradigma maestro-esclavo
 - Modelos de comunicación
 - Arquitectura de acoplamiento montada en códigos esclavos comunicados por paso de mensajes
 - Códigos maestro utilizados
- 3 Ejemplos de aplicación
 - Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
 - **Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación**
 - Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes
 - Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo
- 4 Conclusiones

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Esquema del Segundo Sistema de Parada (SSP) del RA-10:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Subdominios de análisis:

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Subdominios de análisis:

- Subsistema del tanque del reflector,

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Subdominios de análisis:

- Subsistema del tanque del reflector,
- Subsistema de la red hidráulica de descarga,

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Subdominios de análisis:

- Subsistema del tanque del reflector,
- Subsistema de la red hidráulica de descarga,
- Subsistema de la red hidráulica de ecualización de presiones.

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Subdominios de análisis:

- Subsistema del tanque del reflector (0-D),
- Subsistema de la red hidráulica de descarga (3-D),
- ~~Subsistema de la red hidráulica de ecualización de presiones.~~

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Subsistema 0-D:

$$\ddot{h}h + \frac{\dot{h}^2}{2} \left(1 - \left(\frac{A_T}{A_D} \right)^2 \right) + g\Delta h_{red} + \ddot{h}l_D = \frac{p_{atm} - p_1^1}{\rho} + \Delta\hat{u}$$

donde p_1^1 es la presión en la interfaz de acople, A_T es la área transversal del tanque del reflector, A_D es la sección transversal de la línea de descarga, Δh_{red} es la altura total de la columna de líquido en el subsistema, l_D es la longitud total de cañerías en el subsistema, p_{atm} es la presión sobre la superficie libre, y ρ es la densidad del agua. $\Delta\hat{u}$ representa la pérdida de carga por unidad de masa y puede modelarse como:

$$\Delta\hat{u} = \frac{1}{2} v_D^2 \left(\frac{f_D l_D}{D} + \sum_i K_i \right)$$

donde v_D es la velocidad del fluido en la línea de descarga, (que puede escribirse en términos de \dot{h}), $\frac{f_D l_D}{D}$ es el factor de pérdida de carga distribuida en las tuberías, (en función del factor de Darcy f_D , la longitud de tuberías l_D y el diámetro de las mismas D) y $\sum_i K_i$ es la sumatoria de factores de pérdida de carga concentrada.

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Parámetro	Valor
A_T	5.30 m^2
A_D	0.05 m^2
Δh_{red}	$h + 4.98 \text{ m}$
l_D	11.98 m
p_{atm}	92000 Pa
ρ	998 Kg/m^3
D	0.254 m
$\sum_i K_i$	1.13

Cuadro 3: Parámetros del subsistema del tanque del reflector con acople de porción de red hidráulica

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Subsistema 3-D:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + (\bar{U} \cdot \nabla) \bar{U} = -\frac{\nabla P^*}{\rho} + \nabla \cdot \left[(\nu + \nu_T) (\nabla \bar{U} + \nabla \bar{U}^T) \right] + \bar{f} \\ \nabla \cdot \bar{U} = 0 \\ \nu_T = c_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \\ \frac{\partial \kappa}{\partial t} + (\bar{U} \cdot \nabla) \kappa = \frac{c_\mu}{2} \kappa^2 \epsilon \left| \nabla \bar{U} + \nabla \bar{U}^T \right|^2 + \nabla \cdot \left(c_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \nabla \kappa \right) - \epsilon \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + (\bar{U} \cdot \nabla) \epsilon = \frac{c_1}{2} \kappa \left| \nabla \bar{U} + \nabla \bar{U}^T \right|^2 + \nabla \cdot \left(c_\epsilon \frac{\kappa^2}{\epsilon} \nabla \epsilon \right) - c_2 \frac{\epsilon}{\kappa} \end{array} \right. \quad (1)$$

donde \bar{f} es una fuerza volumétrica, κ es la energía cinética turbulenta, ϵ es la disipación viscosa de energía turbulenta, ν_T es la viscosidad turbulenta y P^* es la presión efectiva del sistema, que se calcula como $P^* = P + \frac{2}{3} \kappa$. Las variables mayúsculas refieren a valores medios estadísticos. Los parámetros de las ecuaciones de transporte de κ y ϵ toman los siguientes valores: $c_\mu = 0,09$, $c_1 = 0,126$, $c_2 = 1,92$ y $c_\epsilon = 0,07$ [?].

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Estrategia de resolución:

- Ecuaciones de continuidad:

$$\begin{cases} p_1^1 = p_2^1 \\ Q_1^1 = Q_2^1 \end{cases}$$

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Estrategia de resolución:

- Ecuaciones de continuidad:

$$\begin{cases} p_1^1 = p_2^1 \\ Q_1^1 = Q_2^1 \end{cases}$$

- Selección de condiciones de borde:
 - Subsistema 0-D: condición de tipo *Neumann*
 - Subsistema 3-D: condición de tipo *Dirichlet*

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Estrategia de resolución:

- Ecuaciones de continuidad:

$$\begin{cases} p_1^1 = p_2^1 \\ Q_1^1 = Q_2^1 \end{cases}$$

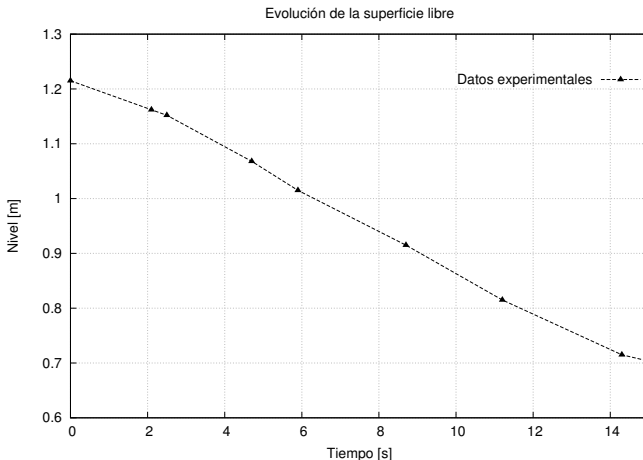
- Selección de condiciones de borde:
 - Subsistema 0-D: condición de tipo *Neumann*
 - Subsistema 3-D: condición de tipo *Dirichlet*
- Ecuaciones de residuos:

$$\begin{cases} (R_{p,Q})_1^1 = Q_1^{1,guess} - Q_1^{1,calc}(p_1^{1,guess}) \\ (R_{p,Q})_2^1 = p_2^{1,guess} - p_2^{1,calc}(Q_2^{1,guess}) \end{cases}$$

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

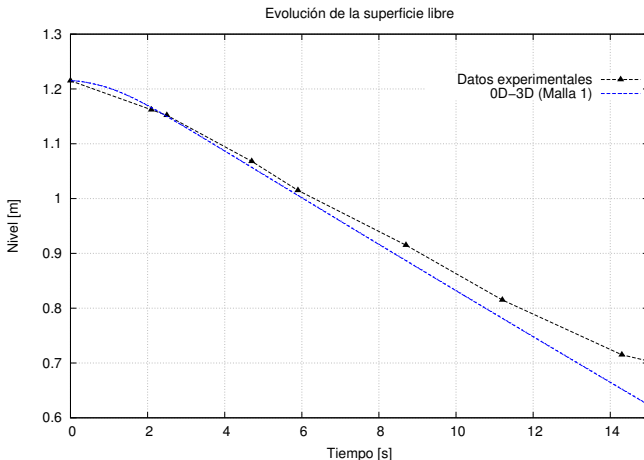
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

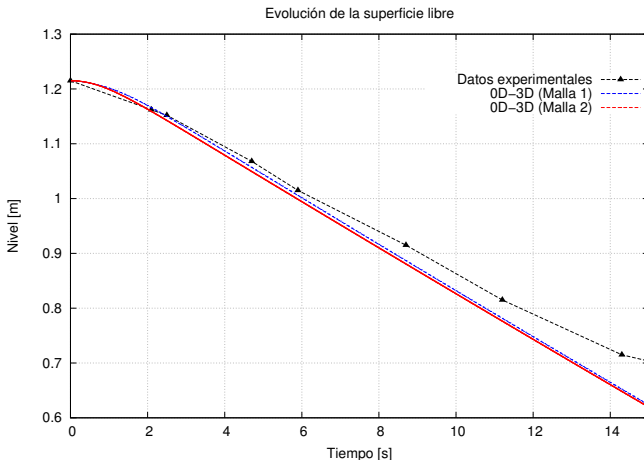
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

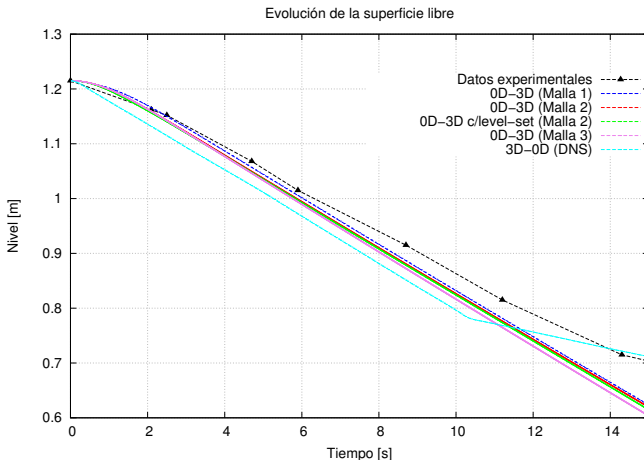
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

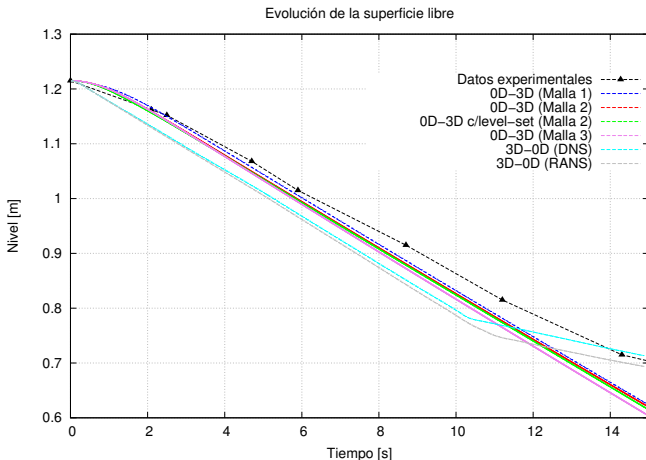
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

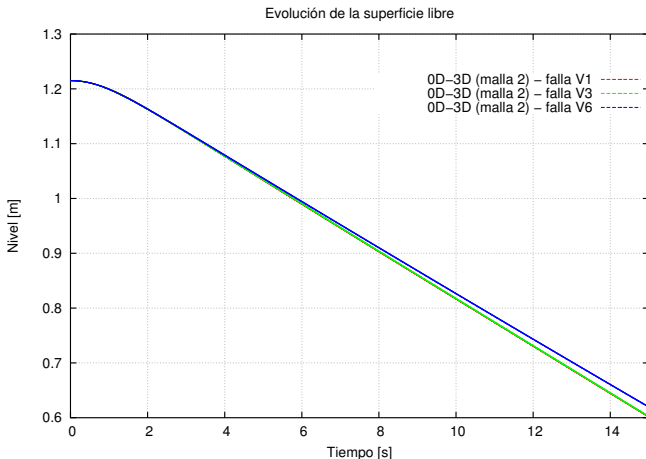
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Análisis de sensibilidad de resultados ante válvula en falla



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

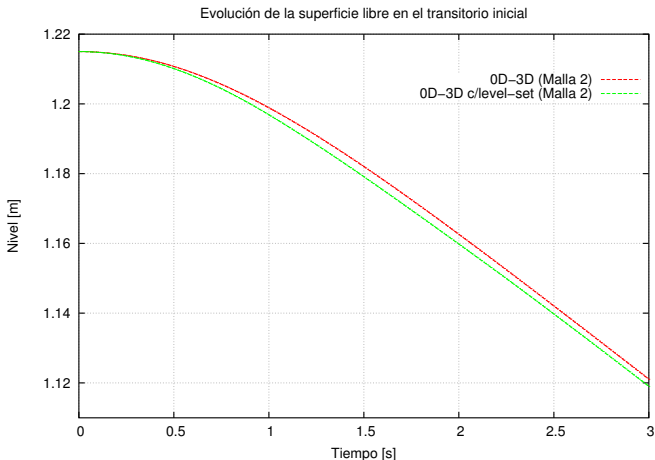
Transporte de superficie libre en cañerías

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \phi = 0$$

Ejemplos de aplicación

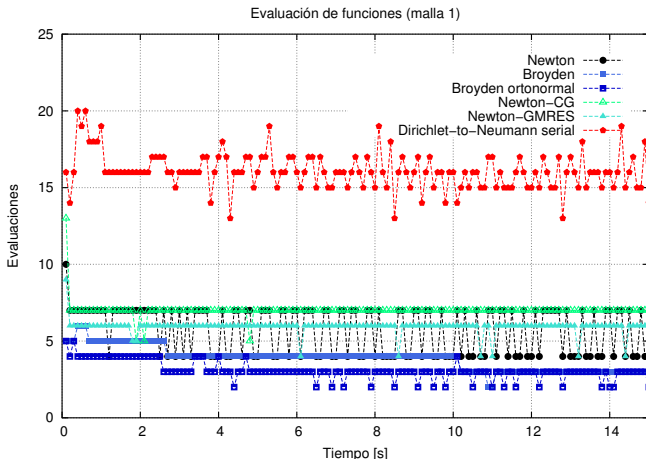
Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Transporte de superficie libre en cañerías



Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Estudio de métodos numéricos para la resolución del sistema de residuos



Outline

- Motivación
- Abordaje del modelado
- Objetivos

3 Ejemplos de aplicación

- Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
- Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
- **Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes**
- Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

- Cada subsistema se modela con ecuaciones de continuidad y de conservación de energía.

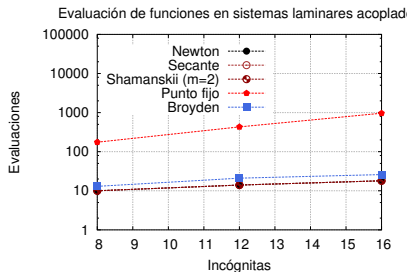
Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

- Cada subsistema se modela con ecuaciones de continuidad y de conservación de energía.
- Ecuaciones de residuos:

$$\begin{cases} R_1 = v_1^{2,guess} - v_1^{2,calc}(CB_1^1, P_1^{2,guess}, P_1^{3,guess}) \\ R_2 = v_1^{3,guess} - v_1^{3,calc}(CB_1^1, P_1^{2,guess}, P_1^{3,guess}) \\ R_3 = P_2^{1,guess} - P_2^{1,calc}(v_2^{1,guess}, CB_2^2, CB_2^3) \\ \dots \end{cases}$$

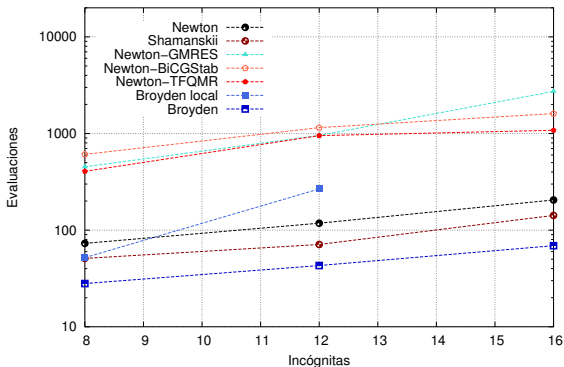
Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

Redes hidráulicas con regímenes de flujo laminar:



Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

Evaluación de funciones en sistemas turbulentos acoplados



Outline

1 Introducción

- Motivación
- Abordaje del modelado
- Objetivos

2 Estrategia de resolución

3 Ejemplos de aplicación

- Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
- Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
- Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes
- **Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo**

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

La estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos desarrollada puede extenderse para resolver sistemas genéricos de ecuaciones acopladas:

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

La estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos desarrollada puede extenderse para resolver sistemas genéricos de ecuaciones acopladas:

- Las variables de acople no necesariamente deben corresponder a condiciones de borde

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

La estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos desarrollada puede extenderse para resolver sistemas genéricos de ecuaciones acopladas:

- Las variables de acople no necesariamente deben corresponder a condiciones de borde
- Las variables de acople no necesariamente deben agruparse en pares

Objetivo: Modelar la dinámica del núcleo de un reactor nuclear mediante acoplamiento de códigos que resuelvan diferentes fenómenos físicos:

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

La estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos desarrollada puede extenderse para resolver sistemas genéricos de ecuaciones acopladas:

- Las variables de acople no necesariamente deben corresponder a condiciones de borde
- Las variables de acople no necesariamente deben agruparse en pares

Objetivo: Modelar la dinámica del núcleo de un reactor nuclear mediante acoplamiento de códigos que resuelvan diferentes fenómenos físicos:

- Neutrónica
 - Distribución de flujo neutrónico
 - Quemado de elementos combustibles
 - Movimiento de barras

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

La estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos desarrollada puede extenderse para resolver sistemas genéricos de ecuaciones acopladas:

- Las variables de acople no necesariamente deben corresponder a condiciones de borde
- Las variables de acople no necesariamente deben agruparse en pares

Objetivo: Modelar la dinámica del núcleo de un reactor nuclear mediante acoplamiento de códigos que resuelvan diferentes fenómenos físicos:

- Neutrónica
 - Distribución de flujo neutrónico
 - Quemado de elementos combustibles
 - Movimiento de barras
- Termohidráulica
 - Distribución de temperaturas
 - Distribución de densidad de refrigerante

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

69/80

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Comisión Nacional
de Energía Atómica

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

- No hay movimiento de barras

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Estrategia de resolución:

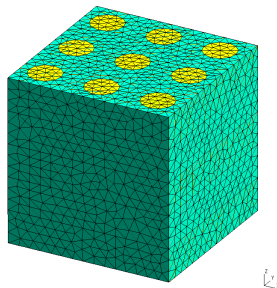
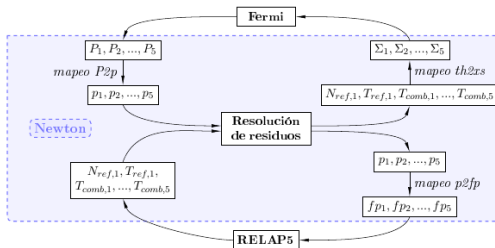
Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

- El código neutrónico recibe como *guess* distribución de secciones eficaces y calcula distribución de potencia.
- El código termohidráulico recibe como *guess* distribución de potencias y calcula distribución de temperaturas y densidades.

Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

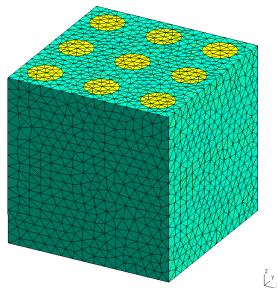
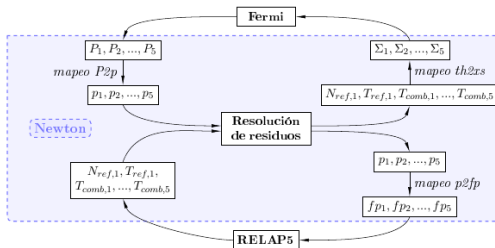
Acoplamiento de **Fermi** y **RELAP5** en modelo simple de núcleo:



Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Acoplamiento de **Fermi** y **RELAP5** en modelo simple de núcleo:



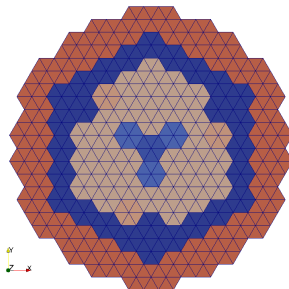
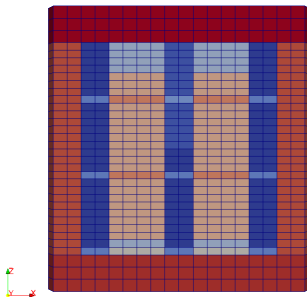
Método no lineal	Δt [días]	Extrapolación de \bar{x}^n	Extrapolación de J^n	Evaluaciones totales	Tiempo total [s]
Broyden	10	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	85	610
Picard	10	$\mathcal{O}(1)$	-	68	684
Punto fijo	10	$\mathcal{O}(1)$	-	87	628
Shamanskii	10	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(0)$	370	2663

Cuadro 4: Evaluaciones totales y tiempo total requerido por cada método no lineal

Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Acoplamiento de **PUMA** y **RELAP5** en modelo de núcleo de CAREM-25:



Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Acoplamiento de PUMA y RELAP5 en modelo de núcleo de CAREM-25:

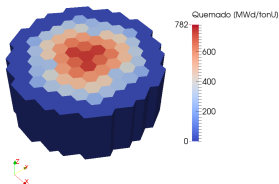


Figura 3: $t=10$ días

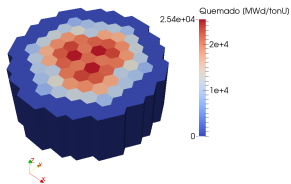


Figura 4: $t=400$ días

Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Acoplamiento de PUMA y RELAP5 en modelo de núcleo de CAREM-25:

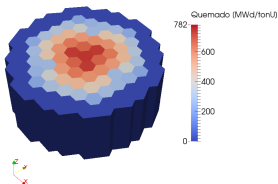


Figura 3: $t=10$ días

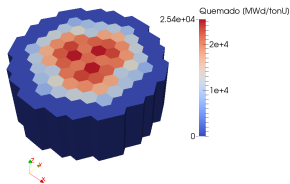


Figura 4: $t=400$ días

Método no lineal	Δt [días]	Extrapolación de \bar{x}^n	Evaluaciones totales	Tiempo total [s]
Picard	5	$\mathcal{O}(0)$	243	11019
Picard	5	$\mathcal{O}(1)$	195	9085
Picard	10	$\mathcal{O}(0)$	131	5898
Picard	10	$\mathcal{O}(1)$	104	4774
Punto fijo	5	$\mathcal{O}(0)$	139	5415
Punto fijo	5	$\mathcal{O}(1)$	186	6990
Punto fijo	10	$\mathcal{O}(0)$	101	3755
Punto fijo	10	$\mathcal{O}(1)$	107	3919

Cuadro 5: Evaluaciones totales y tiempo total requerido por cada método no lineal

Conclusiones

Logros alcanzados

Conclusiones

Logros alcanzados

- Análisis en detalle de algunas porciones de subsistemas considerando la dinámica global del problema.

Conclusiones

Logros alcanzados

- Análisis en detalle de algunas porciones de subsistemas considerando la dinámica global del problema.
- Aceleración de los tiempos de cálculo.

Conclusiones

Logros alcanzados

- Análisis en detalle de algunas porciones de subsistemas considerando la dinámica global del problema.
- Aceleración de los tiempos de cálculo.
- Implementación eficiente de la técnica de acoplamiento desarrollada que permitió acoplar ParGPFEP, RELAP5, Fermi y PUMA, entre otros.
- Estudios en sistemas con bajas y altas cantidades de incógnitas.

Conclusiones

Logros alcanzados

- Análisis en detalle de algunas porciones de subsistemas considerando la dinámica global del problema.
- Aceleración de los tiempos de cálculo.
- Implementación eficiente de la técnica de acoplamiento desarrollada que permitió acoplar ParGPFEP, RELAP5, Fermi y PUMA, entre otros.
- Estudios en sistemas con bajas y altas cantidades de incógnitas.
- Aportes al análisis del SSP del RA-10.

Conclusiones

Logros alcanzados

- Análisis en detalle de algunas porciones de subsistemas considerando la dinámica global del problema.
- Aceleración de los tiempos de cálculo.
- Implementación eficiente de la técnica de acoplamiento desarrollada que permitió acoplar ParGPFEP, RELAP5, Fermi y PUMA, entre otros.
- Estudios en sistemas con bajas y altas cantidades de incógnitas.
- Aportes al análisis del SSP del RA-10.
- En general el método de *Broyden* arrojó los mejores resultados.

Conclusiones

Logros alcanzados

- Análisis en detalle de algunas porciones de subsistemas considerando la dinámica global del problema.
- Aceleración de los tiempos de cálculo.
- Implementación eficiente de la técnica de acoplamiento desarrollada que permitió acoplar ParGPFEP, RELAP5, Fermi y PUMA, entre otros.
- Estudios en sistemas con bajas y altas cantidades de incógnitas.
- Aportes al análisis del SSP del RA-10.
- En general el método de *Broyden* arrojó los mejores resultados.
- Generalización de la técnica de acoplamiento a cálculos de dinámica de núcleo.
- Los estudios en acoplamiento neutrónico-termohidráulico nos permiten realizar la siguiente propuesta: El método del *Punto fijo* acelera el tiempo de cálculo ($\sim 35\%$) respecto del comúnmente utilizado método de *Picard*.

Trabajos futuros

Conclusiones

Trabajos futuros

- Estudios de dinámica de núcleo acoplando mayor cantidad de modelos

Trabajos futuros

- Estudios de dinámica de núcleo acoplando mayor cantidad de modelos
- Estudio de la evolución de la criticidad en el núcleo del RA-10 ante la acción del SSP

Conclusiones

Trabajos futuros

- Estudios de dinámica de núcleo acoplando mayor cantidad de modelos
- Estudio de la evolución de la criticidad en el núcleo del RA-10 ante la acción del SSP
- Diferenciación automática

