

Acoplamiento multiescala en cálculos fluidodinámicos

Director

Dr. Dari, Enzo Alberto

Maestrando

Ing. Caccia, Federico Agustín

28 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

Outline

1 Introducción

- Motivación
- Abordaje del modelado

2 Estrategia de resolución

Motivación

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

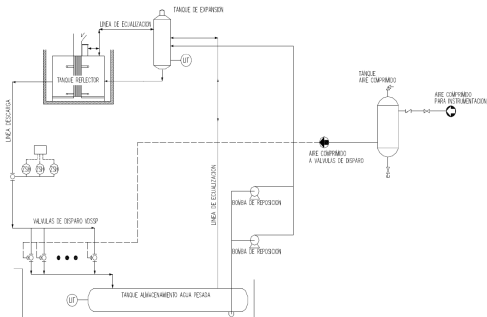


Figura 1: Esquema del circuito de deuterio en una fuente fría de neutrones.

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

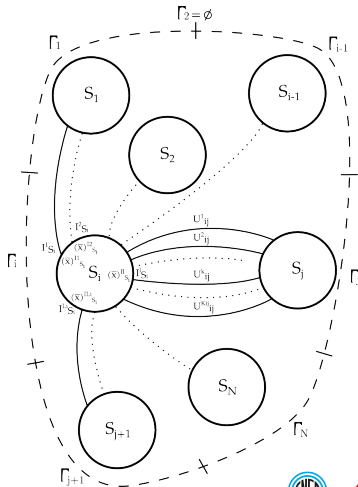
Outline

1 Introducción

- Motivación
- Abordaje del modelado

2 Estrategia de resolución

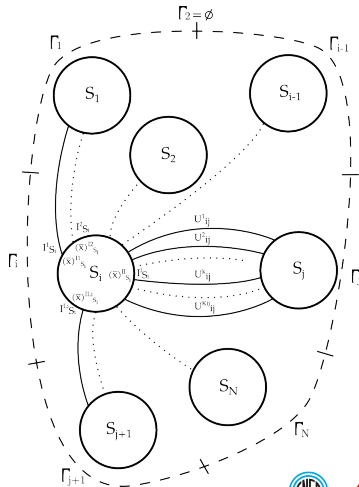
Abordaje del modelado



Introducción

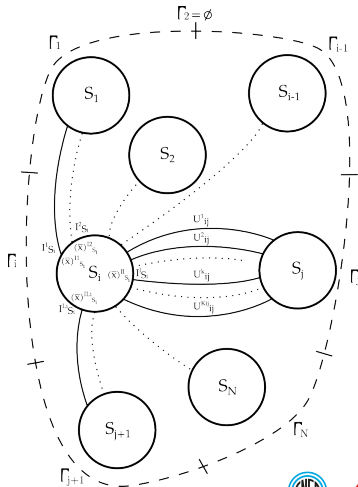
Abordaje del modelado

- Desglosar en subsistemas



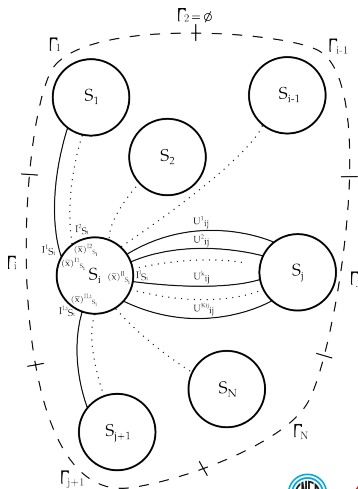
Abordaje del modelado

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



Abordaje del modelado

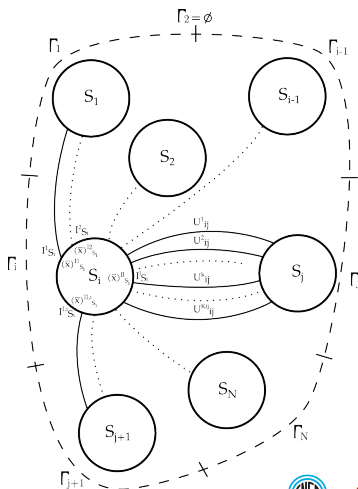
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz



Introducción

Abordaje del modelado

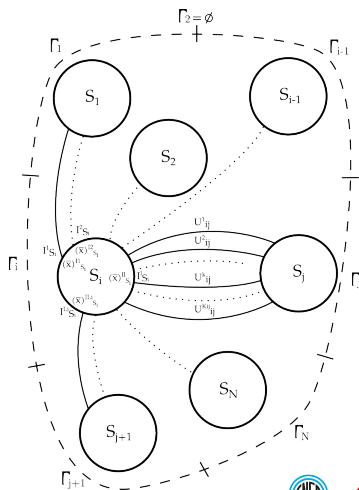
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz
- Total de incógnitas: $2N$



Introducción

Abordaje del modelado

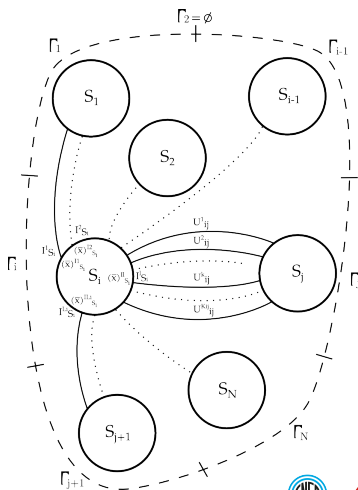
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz
- Total de incógnitas: $2N$
 - N ecuaciones de continuidad que relacionan las incógnitas entre dos interfaces contiguas de distintos subsistemas



Introducción

Abordaje del modelado

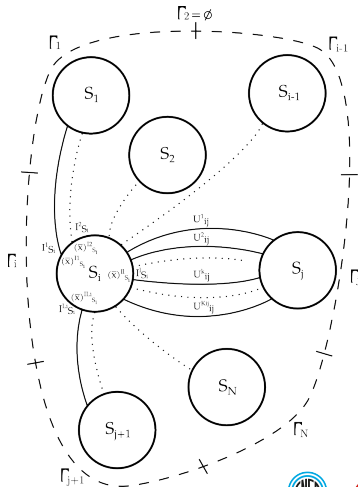
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz
- Total de incógnitas: $2N$
 - N ecuaciones de continuidad que relacionan las incógnitas entre dos interfaces contiguas de distintos subsistemas
 - N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



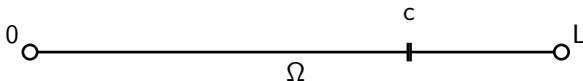
Introducción

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



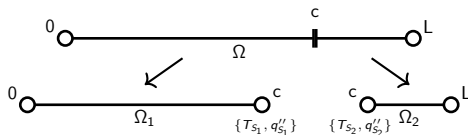
Abordaje del modelado: Ejemplo

$$\begin{cases} -k\Delta u = f \\ u|_{\partial\Omega} = 0 \end{cases}$$


Abordaje del modelado: Ejemplo

-
- The diagram illustrates the decomposition of a domain Ω into two subdomains Ω_1 and Ω_2 . The top part shows a domain Ω with boundary points 0 and L , and an interior point c . The bottom part shows the domain split into Ω_1 (from 0 to c) and Ω_2 (from c to L). Arrows indicate the mapping from the top domain to the subdomains.

Abordaje del modelado: Ejemplo

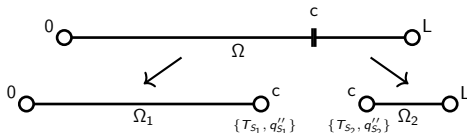


- 4. Ecuaciones de continuidad:

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

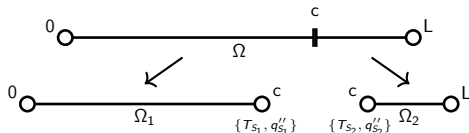
Introducción

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})

Abordaje del modelado: Ejemplo

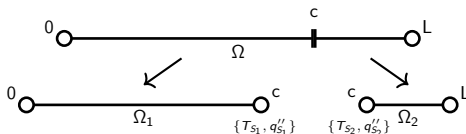


- 5. Ecuaciones modelos según condiciones de borde:
 - a. Selección de condiciones de borde:
 - S_1 condición de tipo *Dirichlet* (recibe T^{guess})
 - S_2 condición de tipo *Neumann* (recibe q''^{guess})
 - b. Selección de ecuaciones modelos:

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

Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo



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

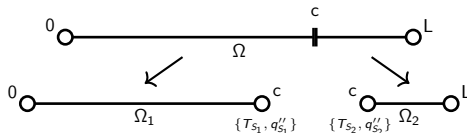
$$\begin{cases} (q''^{calc})_{S_1} = \mathcal{N}_1((T^{guess})_{S_1}) \\ (T^{calc})_{S_2} = \mathcal{D}_2((q''^{calc})_{S_1}) \end{cases}$$

- a2. *Neumann – to – Dirichlet* (cálculos en serie):

$$\{ \dots$$

Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo



- 6. Seleccionar método numérico y resolver:
 - a. Métodos explícitos:
 - a3. *Punto fijo* (cálculos en paralelo):

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

Problemas de evolución

Estrategia:



Problemas de evolución

- Cada sistema utiliza su propia discretización temporal.



Introducción

Problemas de evolución

Estrategia:

- 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.



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).



Introducción

Problemas de evolución

Estrategia:

- Cada subsistema 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).
- Esta metodología no altera las propiedades de estabilidad temporal del método numérico particular utilizado para resolver cada subsistema.

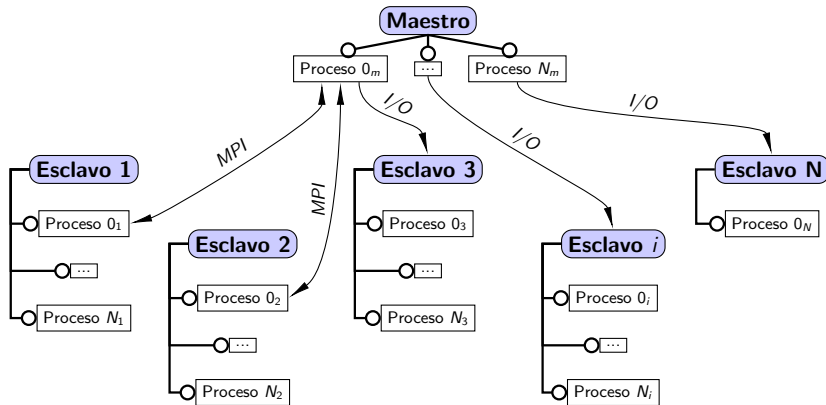


Outline

- 1 Introducción
 - Motivación
 - Abordaje del modelado
- 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

Paradigma maestro-esclavo



Outline

- Motivación
- Abordaje del modelado

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

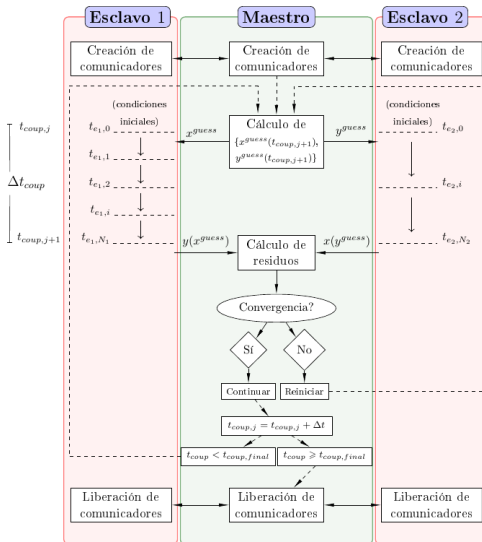
- Paso de mensajes: este modelo es implementado para comunicar procesos de programas en los cuales es posible modificar sus códigos fuente.
 - Programas ejecutados en forma independiente y conectados
 - Programas ejecutados en simultáneo como argumentos de *mpirun*
- Escritura de archivos de entrada 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
- 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
- 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 [?] [?] [?]**
 - Modelos de comunicación por paso de mensajes entre programas ejecutados de manera independiente

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Códigos maestro utilizados

• Coupling [?] [?] [?]

- 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 [?] [?] [?]

- 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
 - Modelos de comunicación por manejo de archivos

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

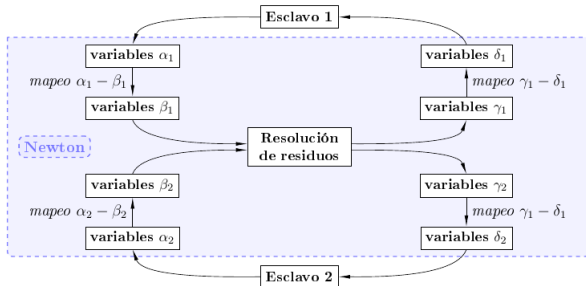
Códigos maestro utilizados

- **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)
 - Métodos de resolución explícitos e implícitos implementados

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

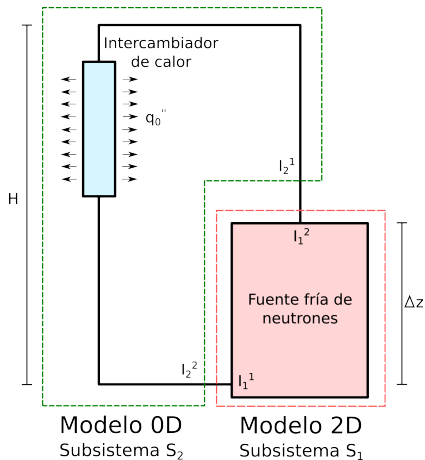
Códigos maestro utilizados

- **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 $\gamma - \delta$)



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: $\rho_0 = 163 \text{ Kg}/\text{m}^3$ 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

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

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

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:

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

- Ecuaciones de residuos en subsistema 2:

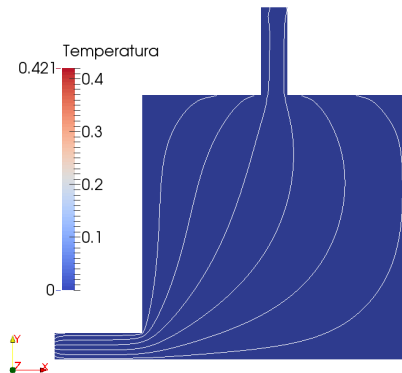
$$\begin{cases} (R_{p,Q})_2^1 = Q_2^{1,guess} - Q_2^{1,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{1/2,guess}) \\ (R_{T,q''})_2^1 = q_2^{1/1,guess} - q_2^{1/1,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{1/2,guess}) \\ (R_{p,Q})_2^2 = Q_2^{2,guess} - Q_2^{2,calc}(p_2^{1,guess},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

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Distintos comportamientos según el Ri obtenido:

- $Ri = 0,8$:

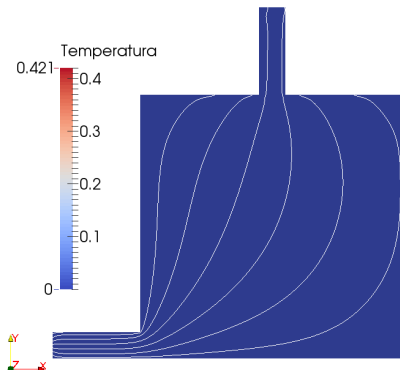


Ejemplos de aplicación

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:

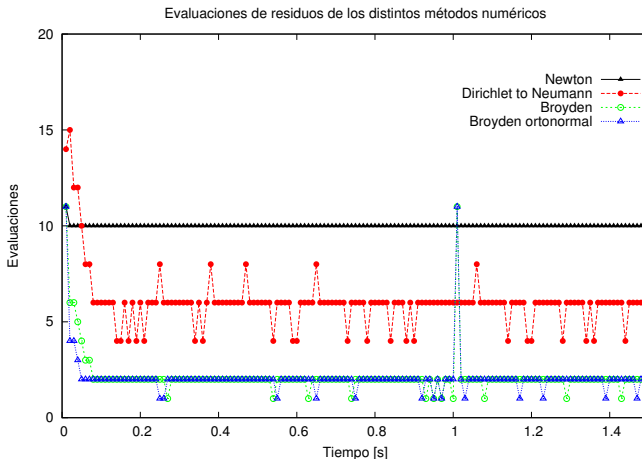
$f_0 [W/m^3]$	$H/\Delta z$	Ri	$\Delta T [K]$	$Q[m^3/s]$	$\Delta p [Pa]$
$2 \cdot 10^4$	1	3.4	0.7	$3,2 \cdot 10^{-3}$	613
	5	1	0.5	$4,2 \cdot 10^{-3}$	614
	10	0.5	0.3	$4,5 \cdot 10^{-3}$	617
$2 \cdot 10^5$	1	6.5	3.6	$4,4 \cdot 10^{-3}$	595
	5	1.7	2.8	$7,6 \cdot 10^{-3}$	605
	10	0.9	2.2	$9,0 \cdot 10^{-3}$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

- Motivación
- Abordaje del modelado

2 Estrategia de resolución

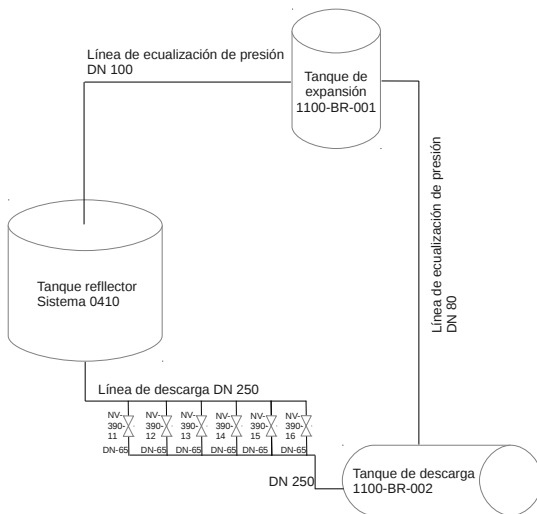
3 Ejemplos de aplicación

- 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

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}), $\frac{f_D \cdot l_D}{D}$ 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

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:

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

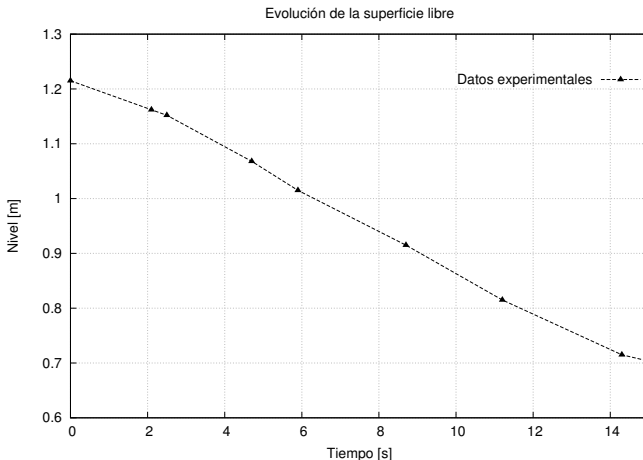
- Selección de condiciones de borde:
 - Subsistema 0-D: condición de tipo *Neumann*
 - Subsistema 3-D: condición de tipo *Dirichlet*
- Ecuaciones de residuos:

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

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

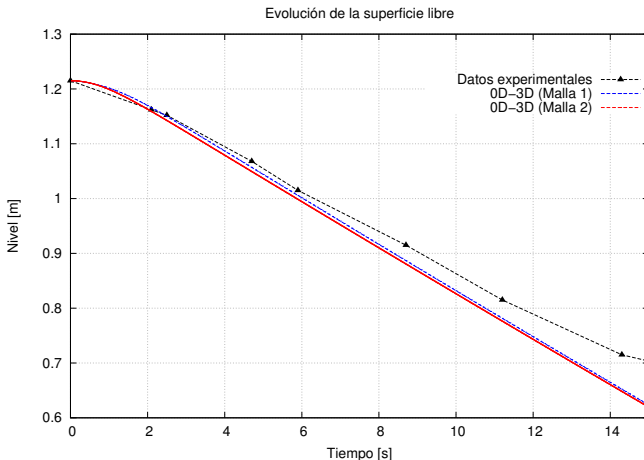
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

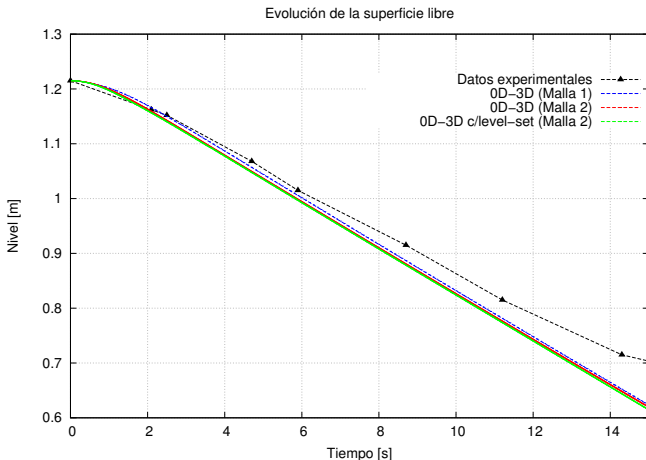
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

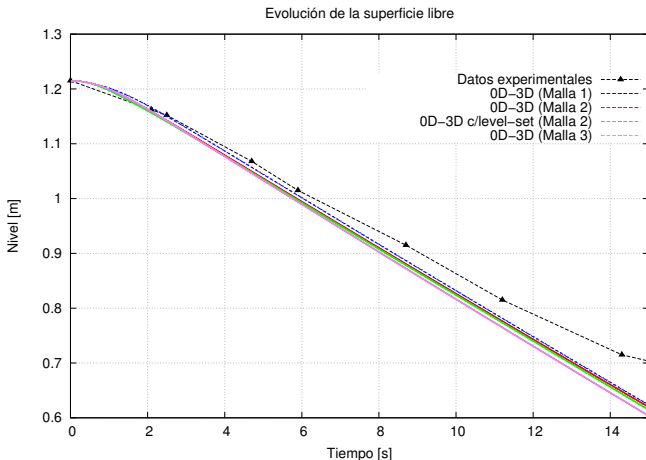
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

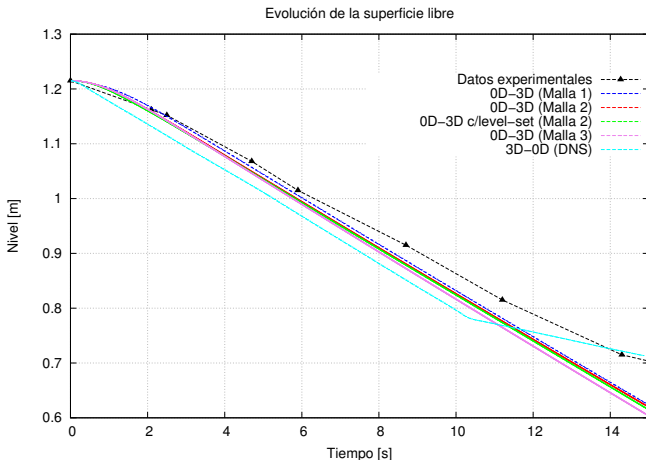
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

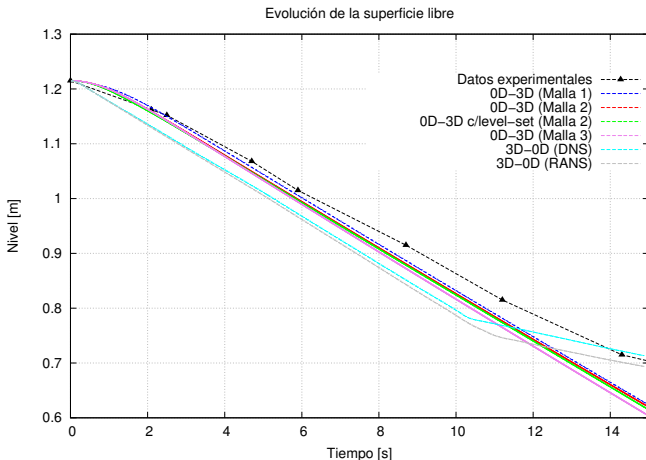
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

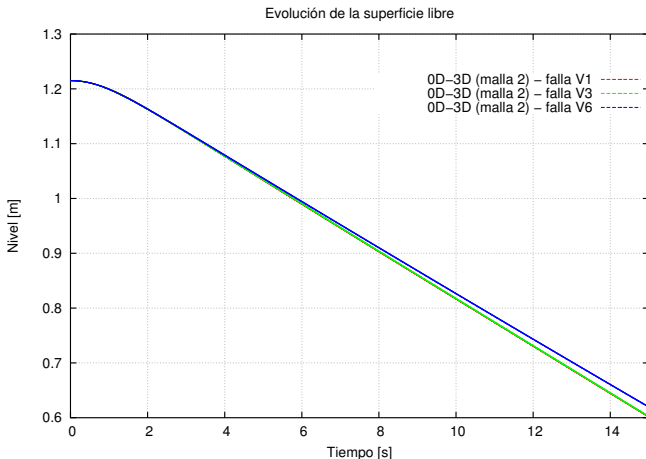
Análisis de la descarga del SSP:



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

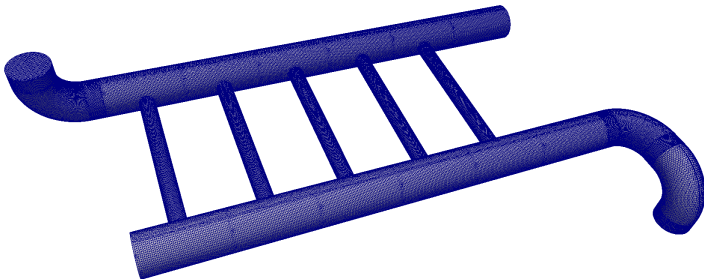
Transporte de superficie libre en cañerías

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

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

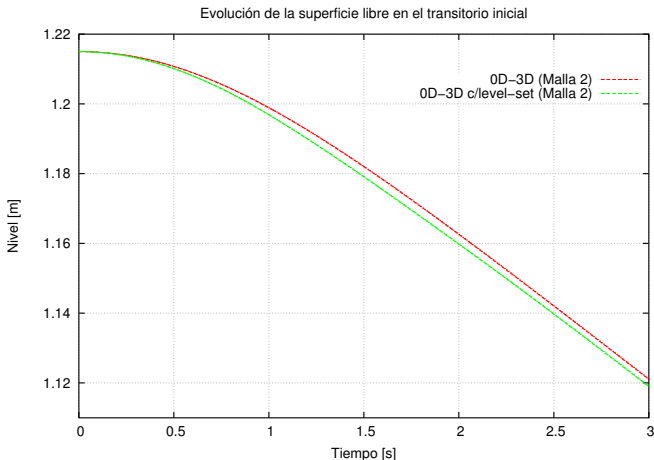
Transporte de superficie libre en cañerías



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

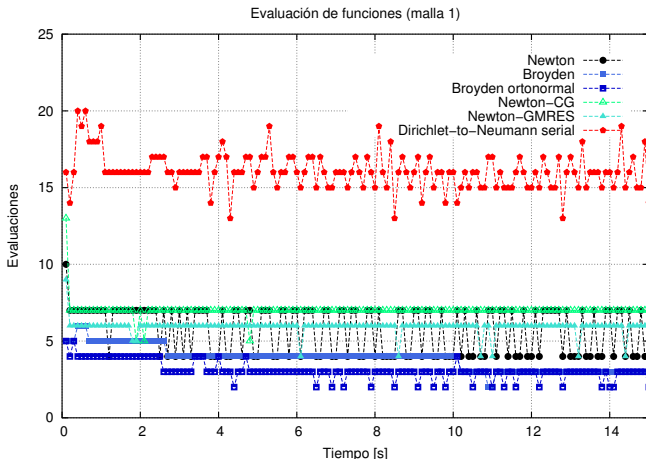
Transporte de superficie libre en cañerías



Ejemplos de aplicación

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

2 Estrategia de resolución

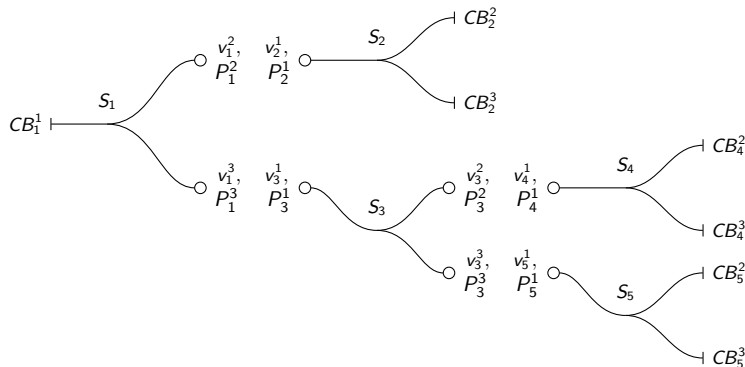
3 Ejemplos de aplicación

- 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

Ejemplos de aplicación

Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

Descomposición disjunta de dominios en un modelo de red hidráulica con 8 incógnitas reducidas en las interfaces de acoplamiento:



Ejemplos de aplicación

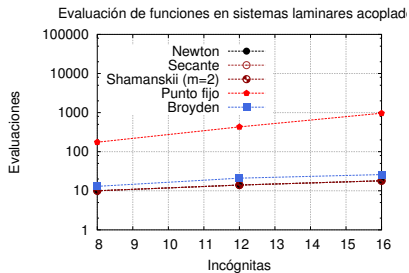
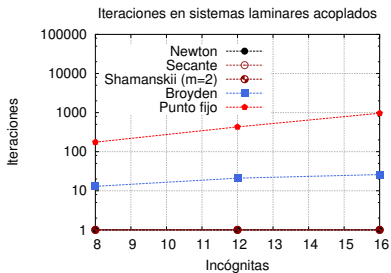
Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

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

Ejemplos de aplicación

Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

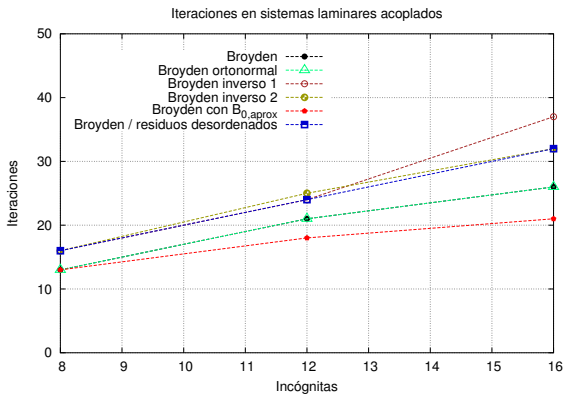
Redes hidráulicas con regímenes de flujo laminar:



Ejemplos de aplicación

Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

Redes hidráulicas con regímenes de flujo laminar:

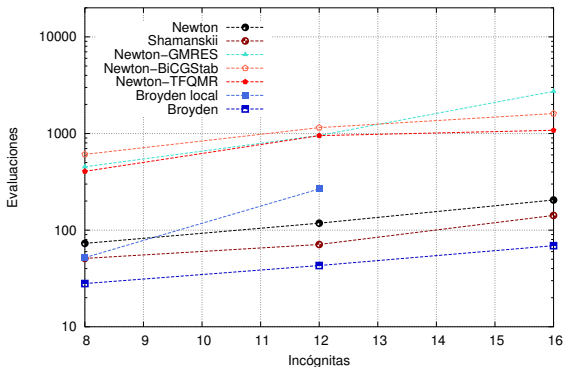


Ejemplos de aplicación

Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

Redes hidráulicas con regímenes de flujo turbulento:

Evaluación de funciones en sistemas turbulentos acoplados



Outline

- Motivación
- Abordaje del modelado

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:

Ejemplos de aplicación

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

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

Ejemplos de aplicación

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

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
- *Swelling* de pastillas

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
- *Swelling* de pastillas
- *Pellet – cladding* interaction

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Primer modelo simplificado: acoplamiento neutrónico-termohidráulico en cálculo de quemado de elementos combustibles. Asumimos que:

- No hay movimiento de barras
- No se modela comportamiento de materiales

Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Modelo neutrónico:

Cálculo de flujo neutrónico:

$$\Delta\bar{\phi} = \frac{1}{k_{eff}}\Sigma\bar{\phi}$$

donde $\vec{\phi}$ es una función vectorial con el valor del flujo neutrónico en cada punto del espacio para diferentes grupos de energía, Σ es la matriz de secciones eficaces asociada a diferentes reacciones para diferentes grupos de energía, y k_{eff} es el factor de multiplicación del reactor.

Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Modelo neutrónico:

Cálculo de flujo neutrónico:

$$\Delta\bar{\phi} = \frac{1}{k_{eff}}\Sigma\bar{\phi}$$

donde $\vec{\phi}$ es una función vectorial con el valor del flujo neutrónico en cada punto del espacio para diferentes grupos de energía, Σ es la matriz de secciones eficaces asociada a diferentes reacciones para diferentes grupos de energía, y k_{eff} es el factor de multiplicación del reactor.

Cálculo de secciones eficaces:

$$\Sigma = \Sigma(N_{ref}, T_{ref}, T_{comb})$$

donde N_{ref} es la densidad del refrigerante, T_{ref} es la temperatura del refrigerante, T_{comb} es la temperatura del combustible, y B es el valor histórico de quemado del material [?].

Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

El núcleo se modela como un único canal, en contacto con una única estructura que genera energía, con diámetro del *pin* y altura equivalente a la altura de la suma total de *pines*.

Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Estrategia de resolución:

Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Estrategia de resolución:

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

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.

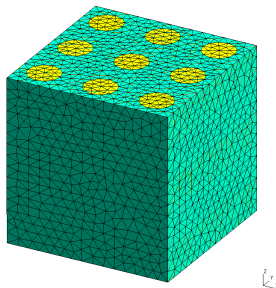
Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

- 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.
- Las variables se acoplan en zonas físicas predefinidas.
- La evolución se discretiza en intervalos de 5 o 10 días.

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

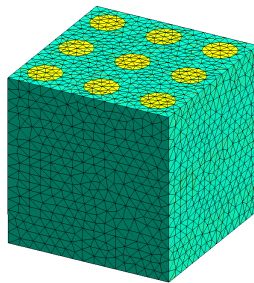
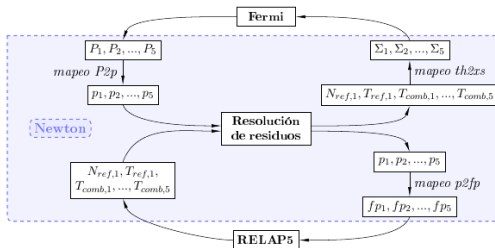
The diagram illustrates the architecture of the RELAP5 code, showing the interaction between three main modules: Fermi, Newton, and RELAP5.

- Fermi Module:**
 - Inputs: P_1, P_2, \dots, P_5 (from mapco P2p) and $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_5$ (from mapco th2xs).
 - Output: $N_{ref,1}, T_{ref,1}, T_{comb,1}, \dots, T_{comb,5}$ (to Newton).
- Newton Module (enclosed in a dashed blue box):**
 - Inputs: p_1, p_2, \dots, p_5 (from mapco P2p) and $N_{ref,1}, T_{ref,1}, T_{comb,1}, \dots, T_{comb,5}$ (from Fermi).
 - Output: $f_{p1}, f_{p2}, \dots, f_{p5}$ (to RELAP5).
- RELAP5 Module:**
 - Input: $f_{p1}, f_{p2}, \dots, f_{p5}$ (from Newton).
 - Output: p_1, p_2, \dots, p_5 (to mapco p2fp).
- Mapco Modules:**
 - mapco P2p:** Transfers P_1, P_2, \dots, P_5 to Fermi and p_1, p_2, \dots, p_5 to Newton.
 - mapco th2xs:** Transfers $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_5$ to Fermi.
 - mapco p2fp:** Transfers p_1, p_2, \dots, p_5 to RELAP5.
- Central Module:**
 - Resolución de residuos:** Receives input from Newton and provides output to both Fermi and RELAP5.



Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

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



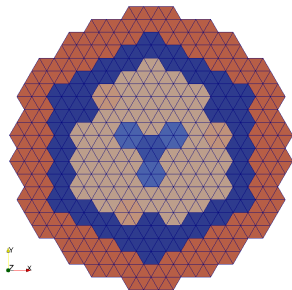
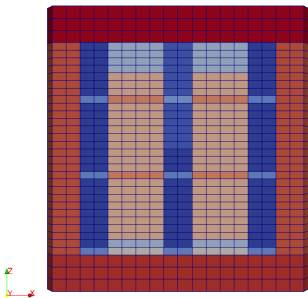
Método no lineal	Δt [días]	Extrapolación de \bar{x}^n	Extrapolación de J^n	Evaluaciones totales	Tiempo total [s]
Broyden	10	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	85	610
Picard	10	$\mathcal{O}(1)$	-	68	684
Punto fijo	10	$\mathcal{O}(1)$	-	87	628
Shamanskii	10	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(0)$	370	2663

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:

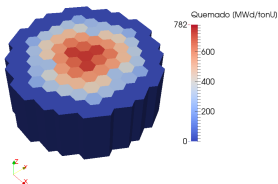


Figura 3: $t=10$ días

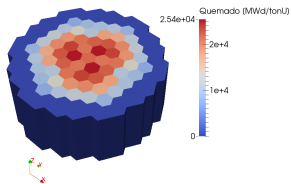


Figura 4: $t=400$ días

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.

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*.

Conclusiones

Trabajos futuros

Conclusiones

Trabajos futuros

- Estudios de dinámica de núcleo acoplando mayor cantidad de modelos

Conclusiones

Trabajos futuros

- Estudios de dinámica de núcleo acoplado 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

Gracias por su atención!