Tesis de Maestría en Ingeniería

Acoplamiento multiescala en cálculos fluidodinámicos

Director

Dr. Dari, Enzo Alberto

Maestrando

Ing. Caccia, Federico Agustín

25 de septiembre de 2017

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Outline

Outline

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Outline

Outline

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Outline

Introducción

Motivación

- Estudios de sistemas complejos.
- Reducción del costo computacional.

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

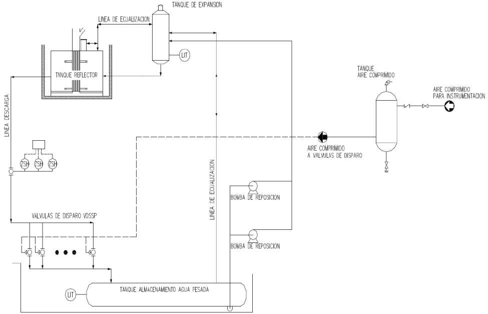


Figura 2: Esquema del Segundo Sistema de Parada del reactor RA-10.

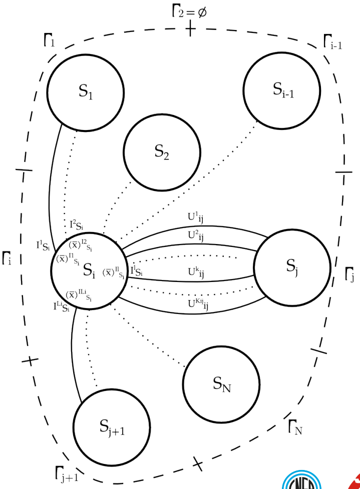
Outline

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

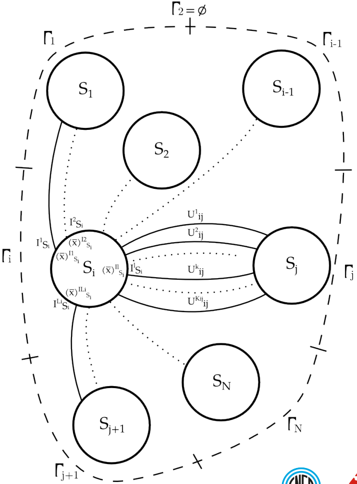
Introducción

Abordaje del modelado



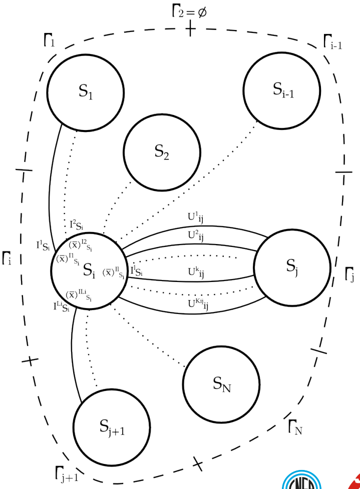
Introducción
Abordaje del modelado

- Desglosar en subsistemas



Introducción
Abordaje del modelado

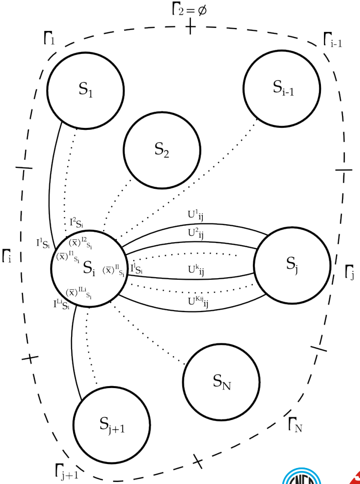
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento



Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Introducción
Abordaje del modelado

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

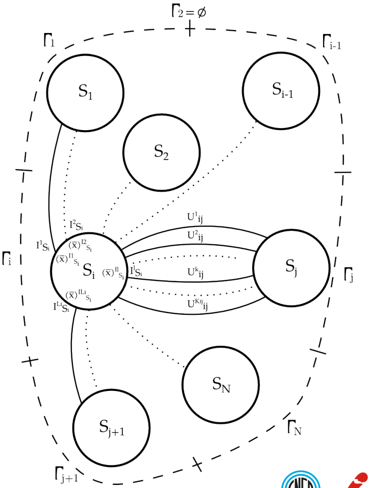


Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

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

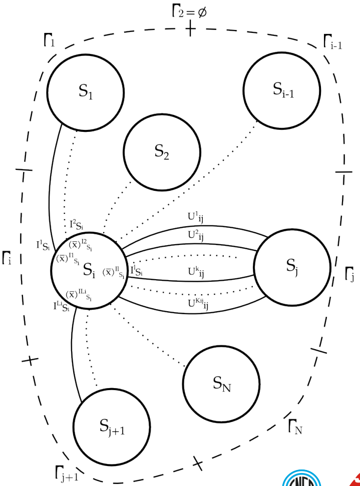


Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Introducción

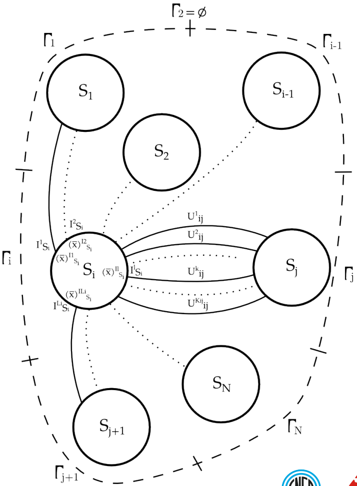
Abordaje del modelado

- 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)

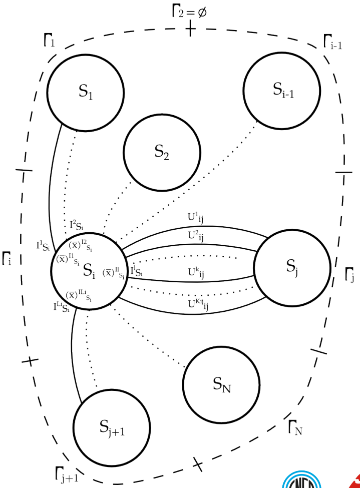


Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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



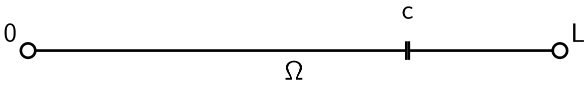
Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo

Ejemplo: El dominio Ω representa una barra de largo L, coficiente de conductividad térmica k y fuente interna de energía f. Calcular el campo de temperaturas en Ω mediante el método de Descomposición Disjunta de Dominios. Modelo:

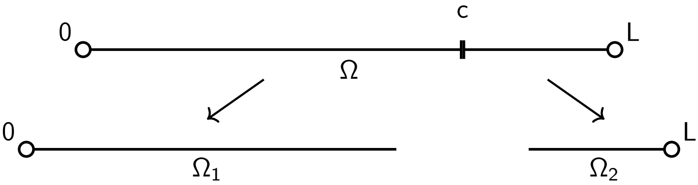
$$\begin{cases} -k\Delta u = f \\ u|_{\partial\Omega} = 0 \end{cases}$$



Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo

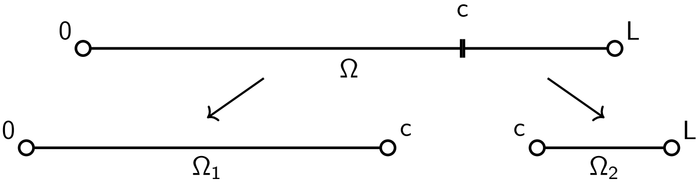
- 1. Descomponer el dominio



Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo

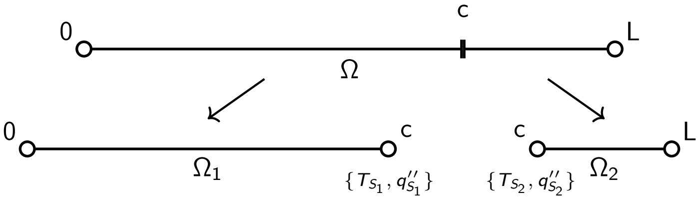
- 1. Descomponer el dominio
- 2. Reconocer interfaces de acople



Introducción

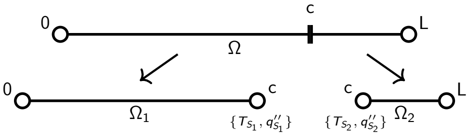
Abordaje del modelado: Ejemplo

- 1. Descomponer el dominio
- 2. Reconocer interfaces de acople
- 3. Identificar pares de variables de acoplamiento



Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo

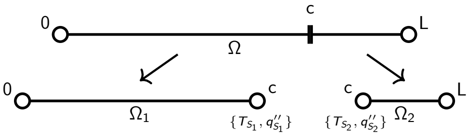


- 4. Ecuaciones de continuidad:

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

Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo



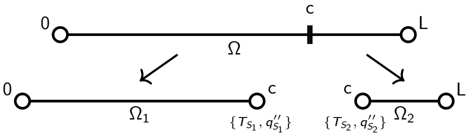
- 5. Ecuaciones modelos según condiciones de borde:
  - a. Selección de condiciones de borde:
    - S_1 condición de tipo *Dirichlet* (recibe T^{guess})
    - S_2 condición de tipo *Neumann* (recibe q''^{guess})
  - b. Selección de ecuaciones modelos:

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

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo



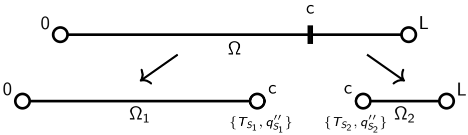
- 6. Seleccionar método numérico y resolver:
  - a. Métodos explícitos:
    - a1. *Dirichlet − to − Neumann* (cálculos en serie):

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

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Introducción

Abordaje del modelado: Ejemplo



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

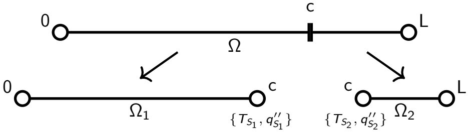
$$\begin{cases} (q''^{calc})_{S_1} = \mathscr{N}_1\left((T^{guess})_{S_1}\right) \\ (T^{calc})_{S_2} = \mathscr{D}_2\left((q''^{guess})_{S_2}\right) \end{cases}$$

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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:

$$\begin{cases} (r_{q''})^1_{S_1} = (q''^{guess}) - (q''^{calc})_{S_1} \\ (r_{q''})^1_{S_2} = (T^{guess}) - (T^{calc})_{S_2} \end{cases}$$

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

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Introducción
Abordaje del modelado

Algunos métodos requieren construcción de matriz jacobiana.
Cada elemento $J_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial x_j}$ puede aproximarse mediante diferencias finitas a primer orden como:

$$J_{ij} \approx \frac{r_i(\bar{x} + \Delta\bar{x}^j) - r_i(\bar{x})}{\|\Delta\bar{x}^j\|}$$

donde $\Delta\bar{x}^j = \bar{e}^j \cdot \Delta^j$

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

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	Libertad en selección de condiciones de borde
	En general convergencia más lenta	En general mejores propiedades de convergencia

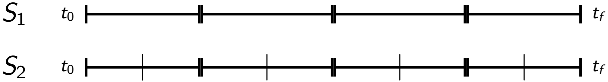
Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Introducción

Problemas de evolución

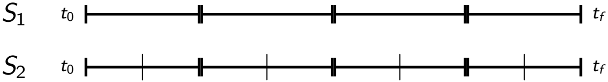
Estrategia:



Introducción
Problemas de evolución

Estrategia:

- Cada susistema utiliza su propia discretización temporal.

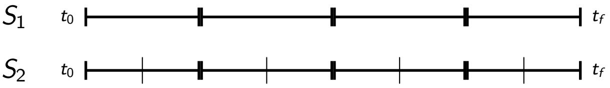


Introducción

Problemas de evolución

Estrategia:

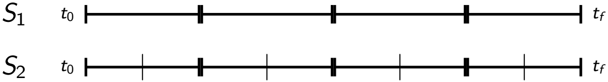
- Cada susistema utiliza su propia discretización temporal.
- La discretización debe coincidir al comienzo (condiciones iniciales), al final y en puntos a lo largo de la evolución.



Introducción
Problemas de evolución

Estrategia:

- Cada susistema 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.

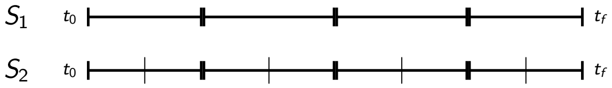


Introducción

Problemas de evolución

Estrategia:

- Cada susistema 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).

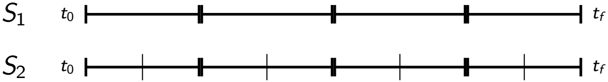


Introducción

Problemas de evolución

Estrategia:

- Cada susistema 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

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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.

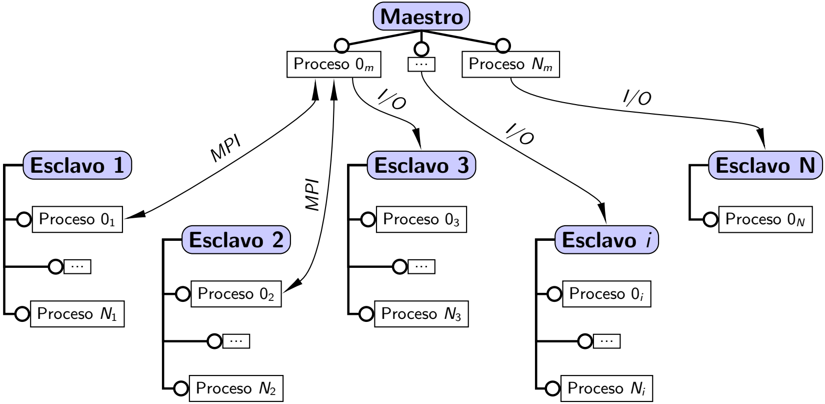
Outline

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Paradigma maestro-esclavo



Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Outline

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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*

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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.

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

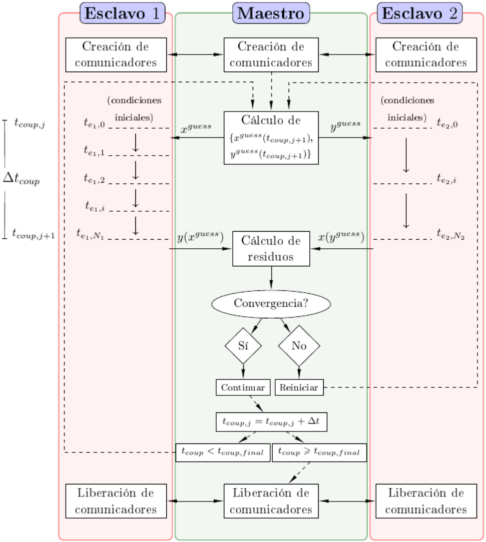
Outline

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

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



Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Outline

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

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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)

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

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

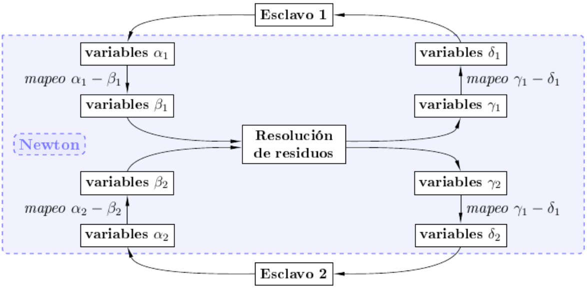
Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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 $\gamma - \delta$)

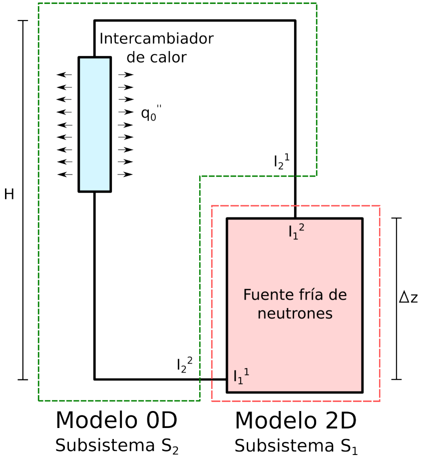


Outline

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación
Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_1:
Parámetros utilizados: $\rho_0 = 163\ Kg/m^3$ a la temperatura de referencia T_{ref}, $\mu = 2{,}8 \cdot 10^{-5}\ Kg/ms$, $c_p = 6333{,}6\ J/KgK$, $k = 0{,}136\ W/mK$ y $\beta = 1{,}32 \cdot 10^{-2} K^{-1}$. Las áreas de las interfaces de acople son $A_2^1 = A_2^2 = 0{,}03\ m^2$.

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

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

Comisión Nacional de Energía Atómica Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación
Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_2:

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación
Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_2:
Parámetros extra utilizados: longitud total de cañerías $L = 15\ m$, sumatoria de coeficientes de pérdida de carga concentrada $\sum K_i = 1{,}72$, rugosidad de cañerías $\epsilon = 0{,}5 \cdot 10^{-4}\ m$.

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación
Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_2:
Parámetros extra utilizados: longitud total de cañerías $L = 15\ m$, sumatoria de coeficientes de pérdida de carga concentrada $\sum K_i = 1{,}72$, rugosidad de cañerías $\epsilon = 0{,}5 \cdot 10^{-4}\ m$.

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

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.

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Estrategia de resolución:

- Ecuaciones de continuidad

$$\begin{cases} Q_1^1 = Q_2^2 \\ Q_1^2 = Q_2^1 \\ p_1^1 = p_2^2 \\ p_1^2 = p_2^1 \\ T_2^1 = T_2^2 \\ T_2^2 = T_2^1 \\ q"_2^1 = -q"_2^2 \\ q"_2^2 = -q"_2^1 \end{cases}$$

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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:

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

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

- Ecuaciones de residuos en subsistema 1:

$$\left\{\begin{array}{l} (R_{p,Q})_1^1 = p_1^{1,guess} - p_1^{1,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{\prime\prime 2,guess}) \\ (R_{T,q"})_1^1 = q_1^{\prime\prime 1,guess} - q_1^{\prime\prime 1,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{\prime\prime 2,guess}) \\ (R_{p,Q})_1^2 = Q_1^{2,guess} - Q_1^{2,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{\prime\prime 2,guess}) \\ (R_{T,q"})_1^2 = T_1^{2,guess} - T_1^{2,calc}(Q_1^{1,guess}, T_1^{1,guess}, p_1^{2,guess}, q_1^{\prime\prime 2,guess}) \end{array}\right.$$

- Ecuaciones de residuos en subsistema 2:

$$\left\{\begin{array}{l} (R_{p,Q})_2^1 = Q_2^{1,guess} - Q_2^{1,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{\prime\prime 2,guess}) \\ (R_{T,q"})_2^1 = q_2^{\prime\prime 1,guess} - q_2^{\prime\prime 1,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{\prime\prime 2,guess}) \\ (R_{p,Q})_2^2 = Q_2^{2,guess} - Q_2^{2,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{\prime\prime 2,guess}) \\ (R_{T,q"})_2^2 = T_2^{2,guess} - T_2^{2,calc}(p_2^{1,guess}, T_2^{1,guess}, p_2^{2,guess}, q_2^{\prime\prime 2,guess}) \end{array}\right.$$

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

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

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

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

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

Comisión Nacional de Energía Atómica

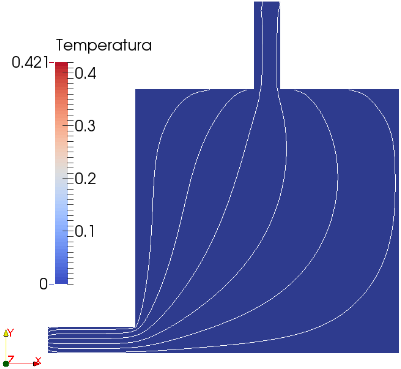
Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Distintos comportamientos según el *Ri* obtenido:

- $Ri = 0{,}8$:



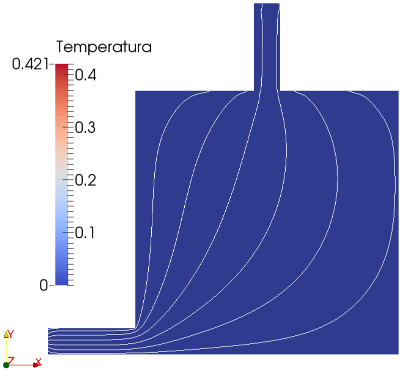
Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

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	ΔT $[K]$	$Q[m^3/s]$	Δp $[Pa]$
$2 \cdot 10^4$	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.

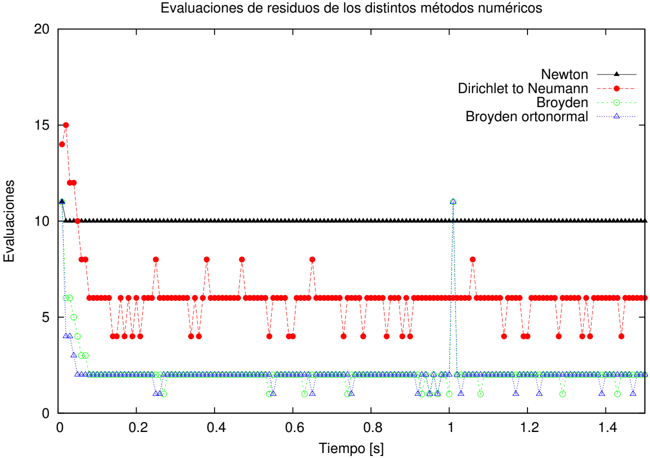
Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

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



Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Outline

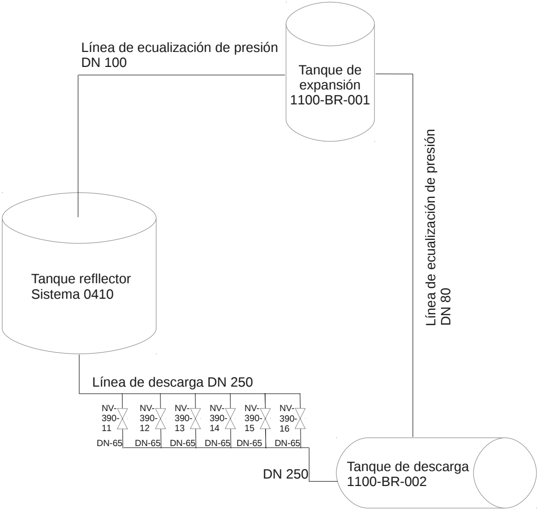
Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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,

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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~~.

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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.

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

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}	$h + 4.98\ m$
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

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Subsistema 3-D:

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

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:

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

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

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*

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

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:

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

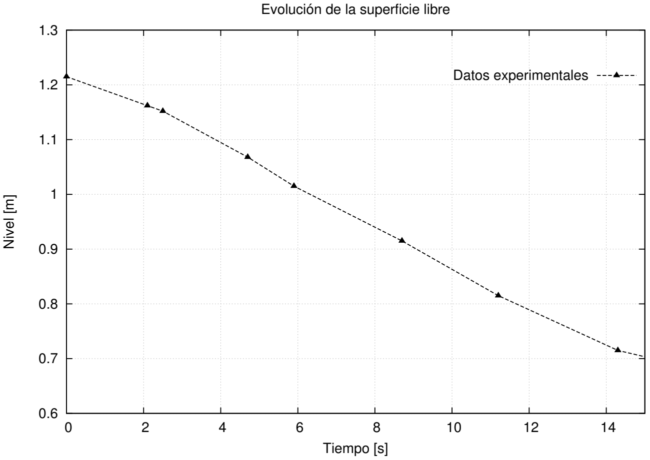
Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

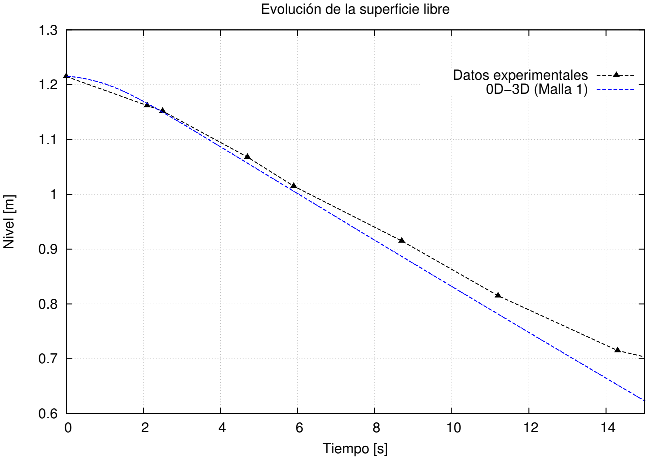
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

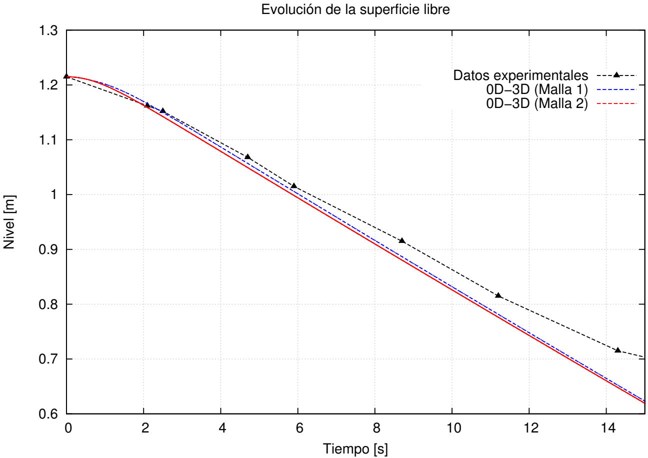
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

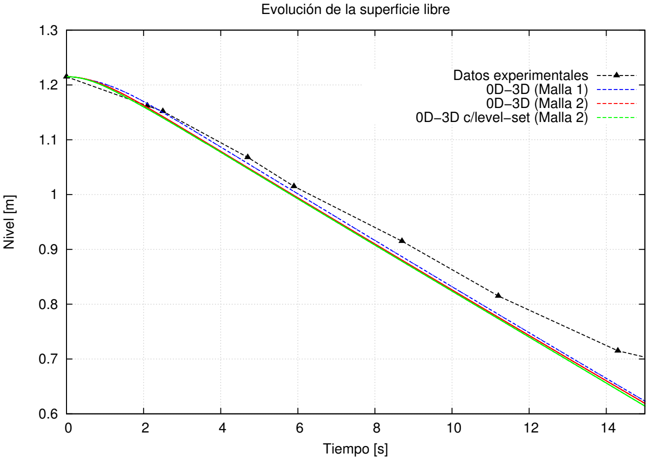
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Análisis de la descarga del SSP:

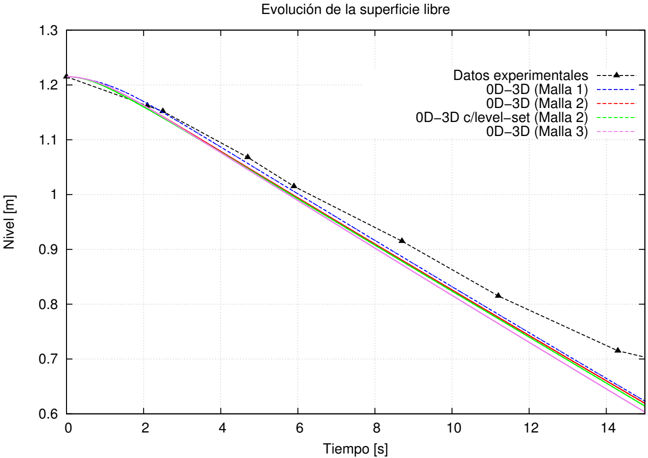


Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

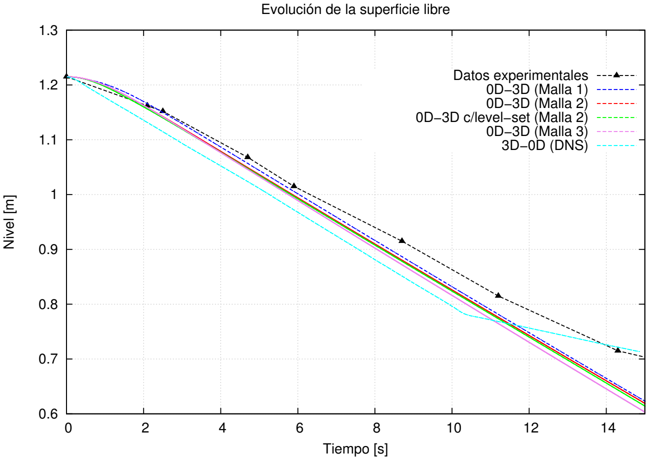
Análisis de la descarga del SSP:



Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Análisis de la descarga del SSP:



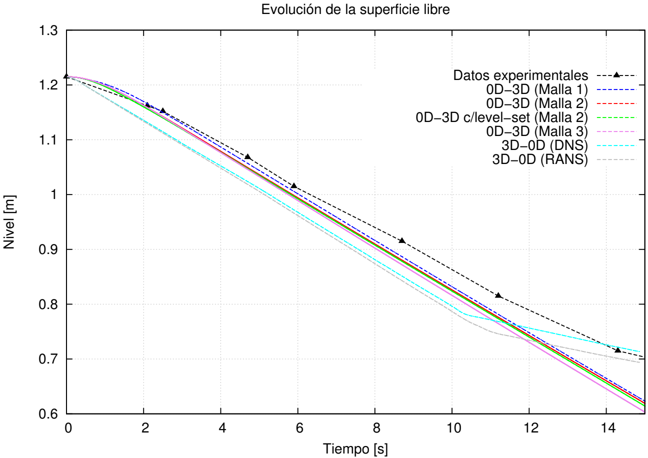
Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Análisis de la descarga del SSP:

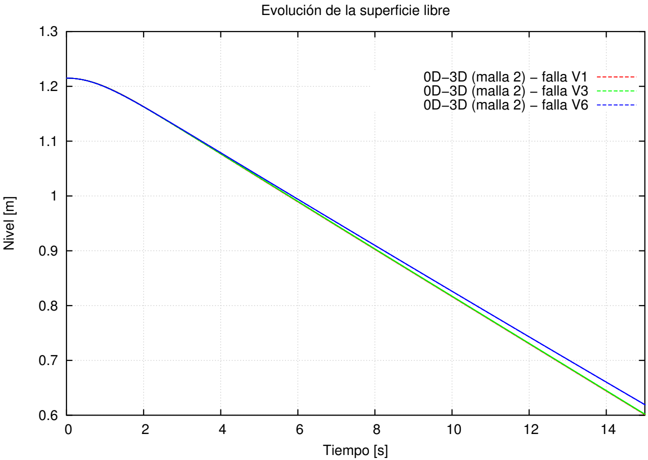


Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro

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

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

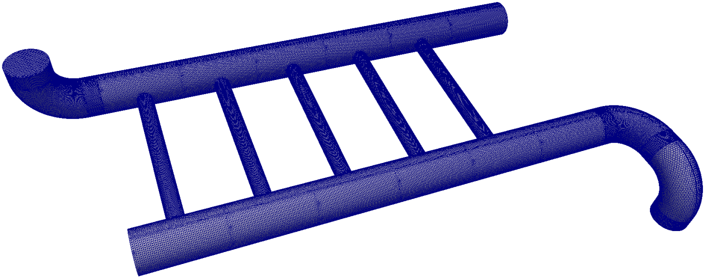
Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Transporte de superficie libre en cañerías

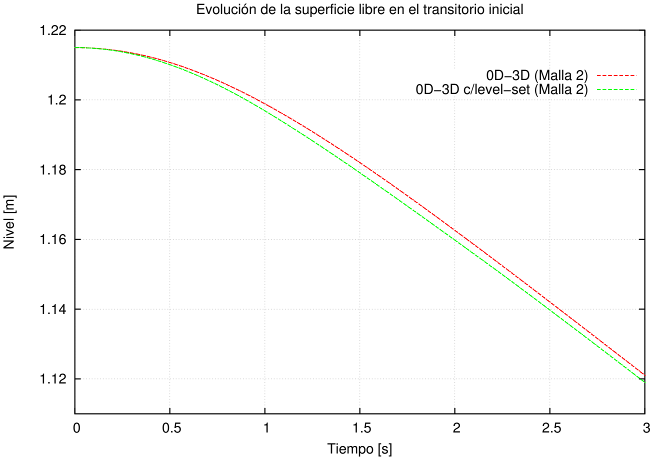


Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación
Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

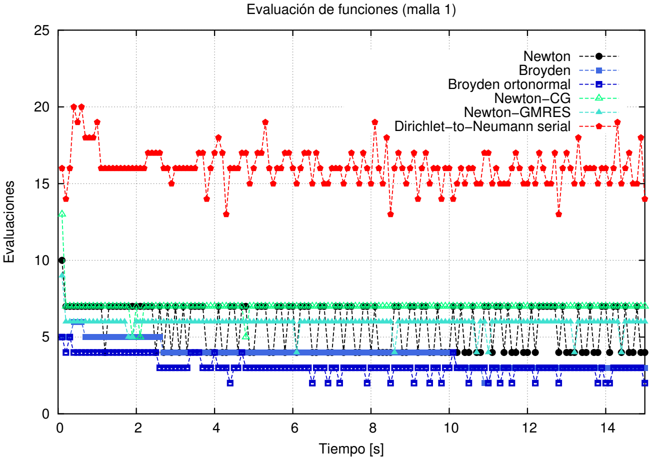
Transporte de superficie libre en cañerías



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



Comisión Nacional de Energía Atómica

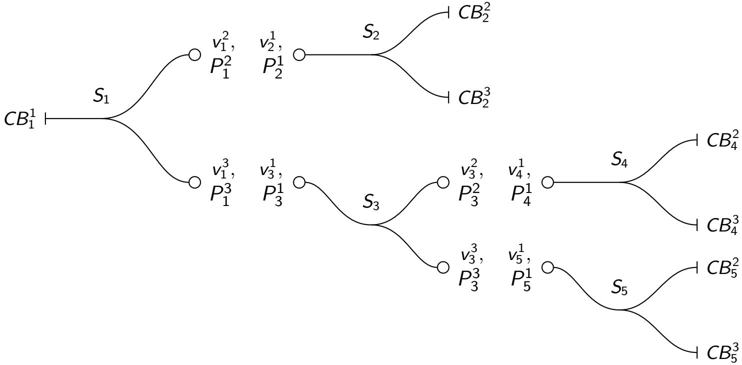
Instituto Balseiro

Outline

Ejemplos de aplicación

Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

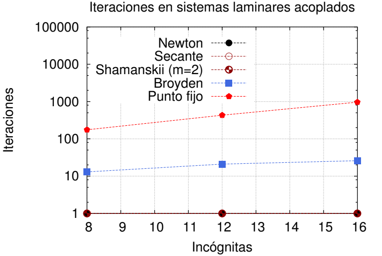
Descomposición disjunta de dominios en un modelo de red hidráulica con 8 incógnitas reducidas en las interfaces de acoplamiento:

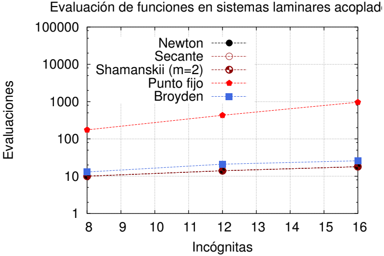


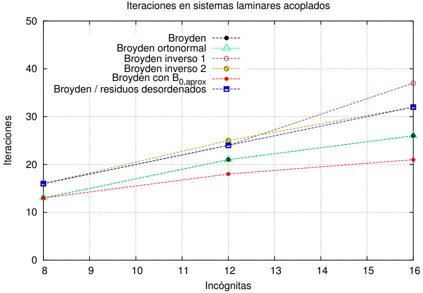
Ejemplos de aplicación

Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

Redes hidráulicas con regímenes de flujo laminar:



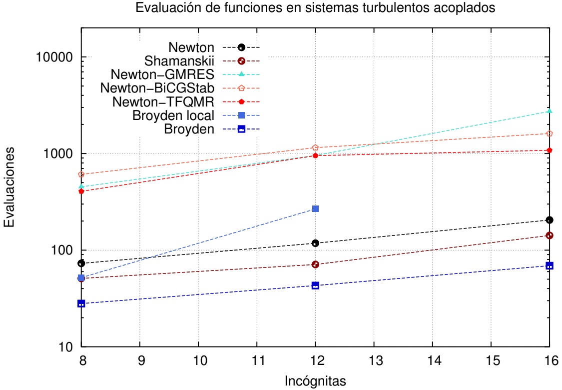




Ejemplos de aplicación

Resolución de redes hidráulicas de múltiples componentes

Redes hidráulicas con regímenes de flujo turbulento:



Outline

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

Ejemplos de aplicación

Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Conclusiones

Logros alcanzados

Conclusiones

Trabajos futuros

Gracias por su atención!

Comisión Nacional de Energía Atómica

Instituto Balseiro

For Further Reading I

A. Author.
Handbook of Everything.
Some Press, 1990.

S. Someone.
On this and that.
Journal of This and That, 2(1):50–100, 2000.