

# Acoplamiento multiescala en cálculos fluidodinámicos

Director

*Dr. Dari, Enzo Alberto*

Maestrando

*Ing. Caccia, Federico Agustín*

29 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

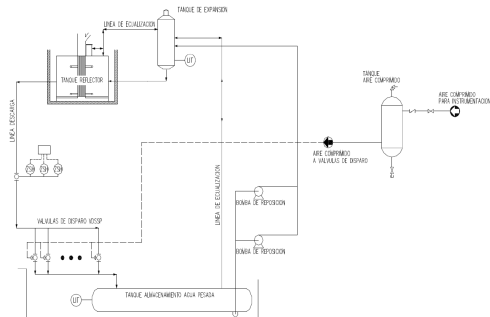


## Motivación

- 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.

○○●○○○○○○○○○○○○○○○○○○

- Motivación

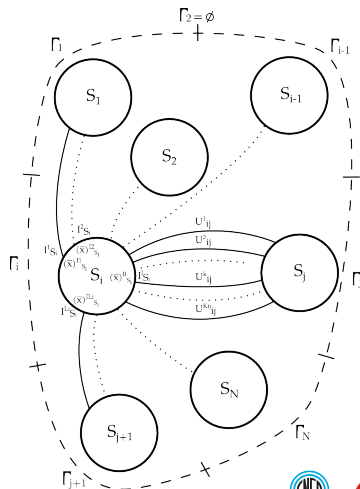
- Abordaje del modelado

- Paradigma maestro-esclavo

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



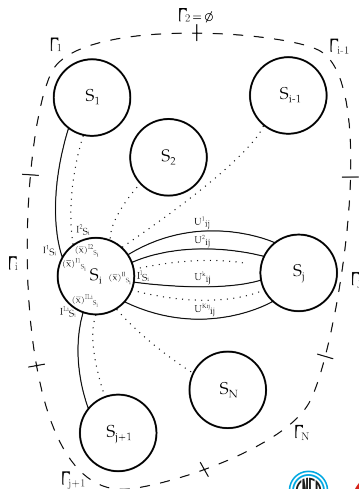
## Abordaje del modelado



# Introducción

## Abordaje del modelado

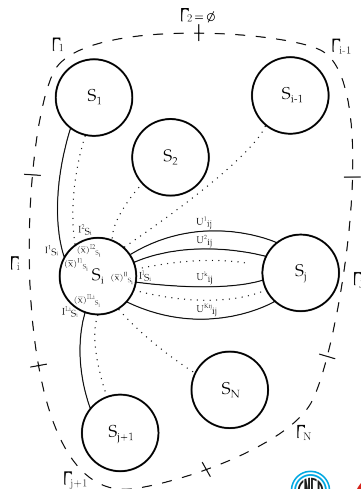
- Desglosar en subsistemas



# Introducción

## Abordaje del modelado

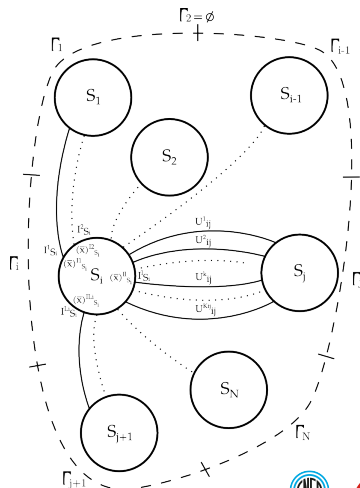
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento



# Introducción

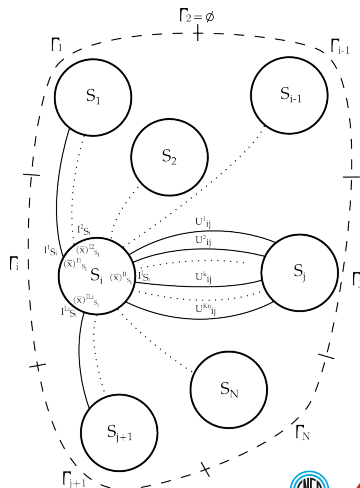
## Abordaje del modelado

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



## Abordaje del modelado

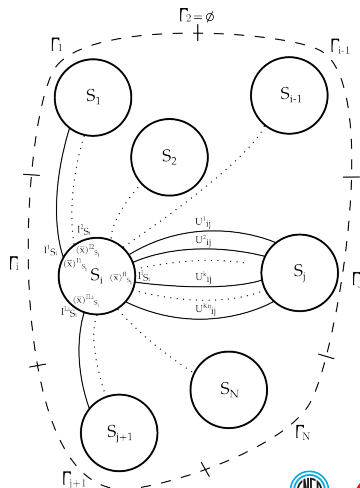
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz (problemas elípticos)
- Total de incógnitas:  $2N$



# Introducción

## Abordaje del modelado

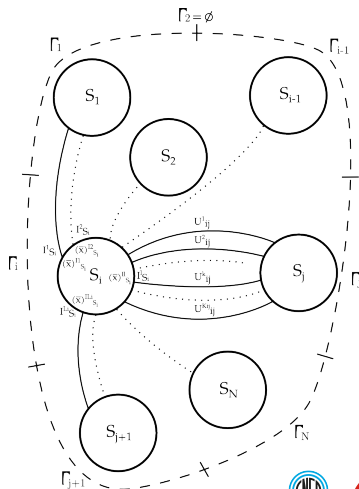
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz (problemas elípticos)
- Total de incógnitas:  $2N$ 
  - $N$  ecuaciones de continuidad que relacionan las incógnitas entre dos interfaces contiguas de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



# Introducción

## Abordaje del modelado

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









## Abordaje del modelado: Ejemplo

- 
- The diagram illustrates the decomposition of a domain  $\Omega$  into two subdomains  $\Omega_1$  and  $\Omega_2$ . The top part shows a domain  $\Omega$  with boundary points  $0$  and  $L$ , and a point  $c$  on the boundary. The bottom part shows the domain  $\Omega$  decomposed into two subdomains  $\Omega_1$  and  $\Omega_2$ , with boundary points  $0$  and  $L$  respectively. Arrows indicate the mapping from the top domain to the bottom subdomains.

## Abordaje del modelado: Ejemplo

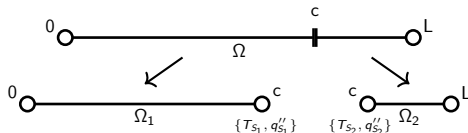
- 
- The diagram illustrates the decomposition of a domain  $\Omega$  into two subdomains  $\Omega_1$  and  $\Omega_2$ . The top part shows a domain  $\Omega$  with boundary points  $0$ ,  $c$ , and  $L$ . The bottom part shows the decomposition into  $\Omega_1$  (from  $0$  to  $c$ ) and  $\Omega_2$  (from  $c$  to  $L$ ). Arrows indicate the mapping from the top domain to the subdomains.





# 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  $q''^{guess}$ )











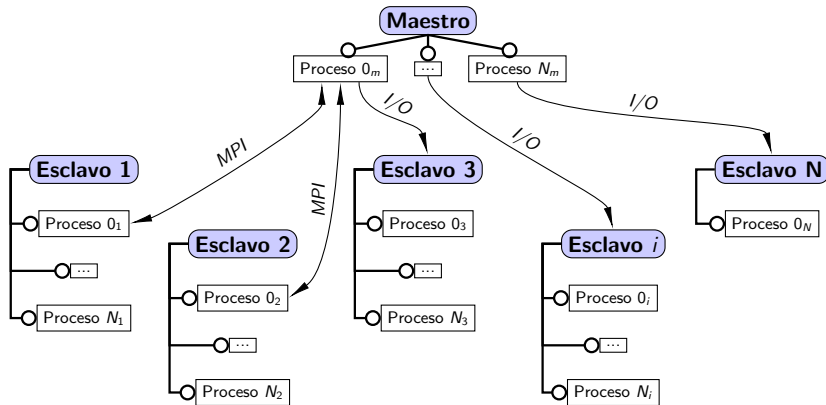


# Outline

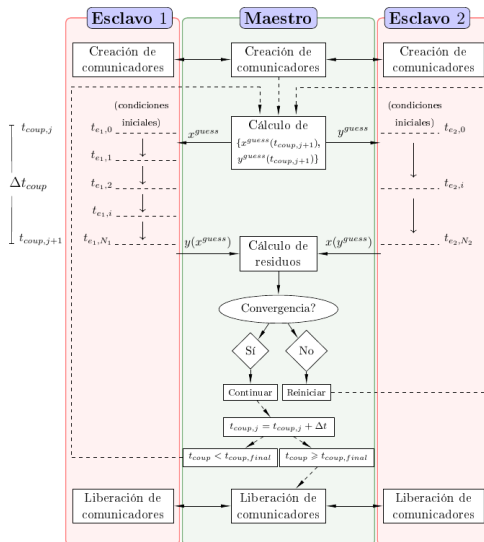
- 1 Introducción
  - Motivación
  - Abordaje del modelado
- 2 Estrategia de resolución
  - Paradigma maestro-esclavo
- 3 Ejemplos de aplicación
  - Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
  - Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
  - Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo
- 4 Conclusiones

# Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

## Paradigma maestro-esclavo



# Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

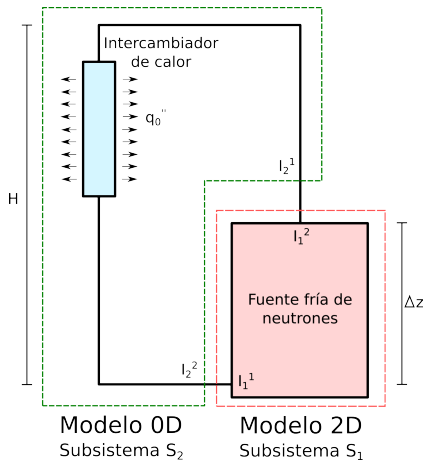


# Outline

- 1 Introducción
  - Motivación
  - Abordaje del modelado
- 2 Estrategia de resolución
  - Paradigma maestro-esclavo
- 3 Ejemplos de aplicación
  - **Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado**
  - Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
  - 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:  $\rho_0 = 163 \text{ Kg}/\text{m}^3$  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  $\epsilon = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ .

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

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  $p_1^2 = p_{ref} = 0$ )

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

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

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

# Ejemplos de aplicación

## Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

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

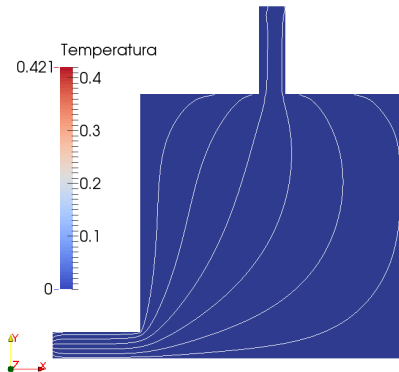
**Cuadro 2:** Principales resultados del cálculo para el análisis de la fuente fría variando la magnitud de la fuente interna y la altura del sistema de enfriamiento.

# Ejemplos de aplicación

## Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Distintos comportamientos según el  $Ri$  obtenido:

- $Ri = 0,8$ :

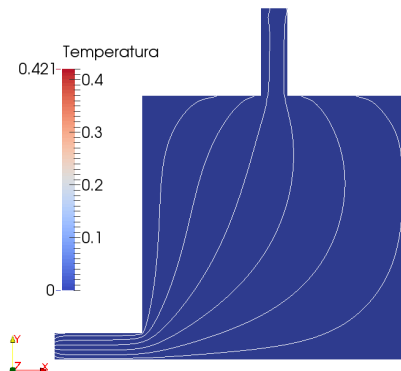


# Ejemplos de aplicación

## Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Distintos comportamientos según el  $Ri$  obtenido:

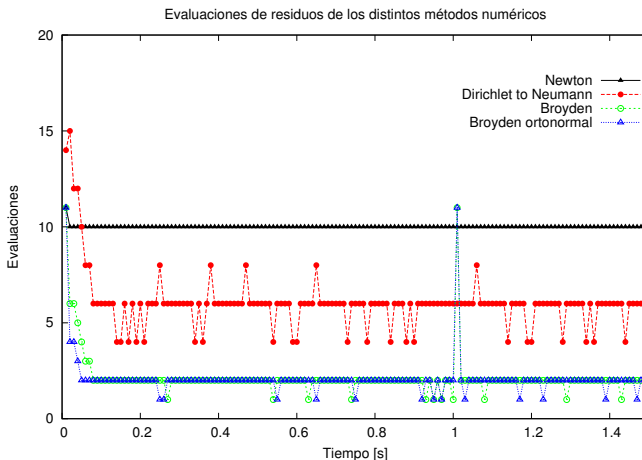
- $Ri = 84$ :



# Ejemplos de aplicación

## Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

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





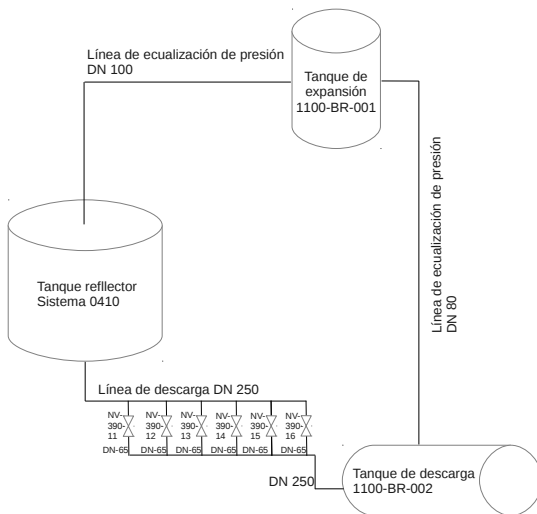
# Outline

- 1 Introducción
  - Motivación
  - Abordaje del modelado
- 2 Estrategia de resolución
  - Paradigma maestro-esclavo
- 3 Ejemplos de aplicación
  - Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
  - **Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación**
  - 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,  $\Delta h_{red}$  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  $\rho$  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
$A_T$	$5.30 \text{ m}^2$
$A_D$	$0.05 \text{ m}^2$
$\Delta h_{red}$	$h + 4.98 \text{ m}$
$l_D$	$11.98 \text{ m}$
$p_{atm}$	$92000 \text{ Pa}$
$\rho$	$998 \text{ Kg/m}^3$
$D$	$0.254 \text{ m}$
$\sum_i K_i$	$1.13$

**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:

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

donde  $\bar{f}$  es una fuerza volumétrica,  $\kappa$  es la energía cinética turbulenta,  $\epsilon$  es la disipación viscosa de energía turbulenta,  $\nu_T$  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  $\kappa$  y  $\epsilon$  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:

- Elección de variables:  $\{p, Q\}$

# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Estrategia de resolución:

- Elección de variables:  $\{p, Q\}$
- 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:

- Elección de variables:  $\{p, Q\}$
- 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:

- Elección de variables:  $\{p, Q\}$
- Ecuaciones de continuidad:

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

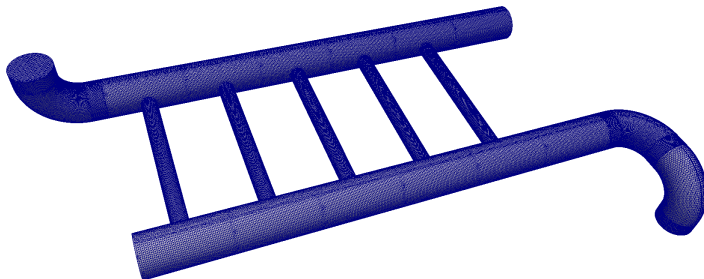
- Selección de condiciones de borde:
  - Subsistema 0-D: condición de tipo *Neumann*
  - Subsistema 3-D: condición de tipo *Dirichlet*
- Ecuaciones de residuos:

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

# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

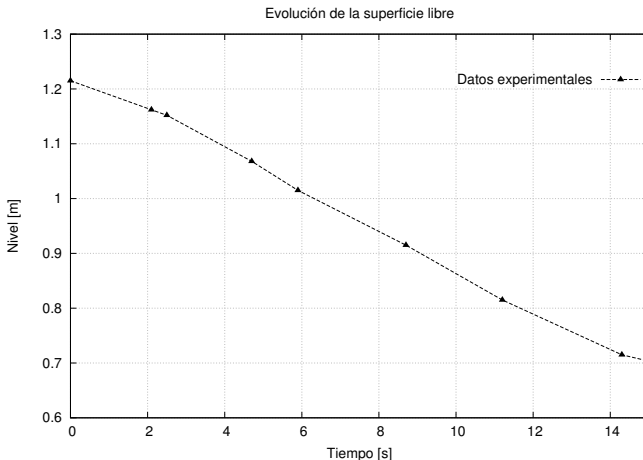
Transporte de superficie libre en cañerías



# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

### Análisis de la descarga del SSP:

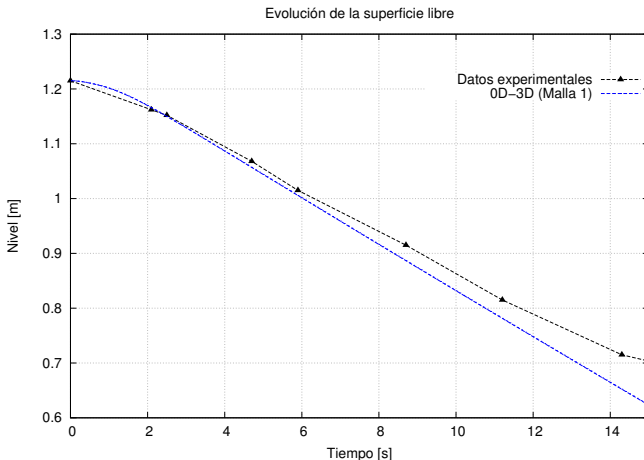




# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

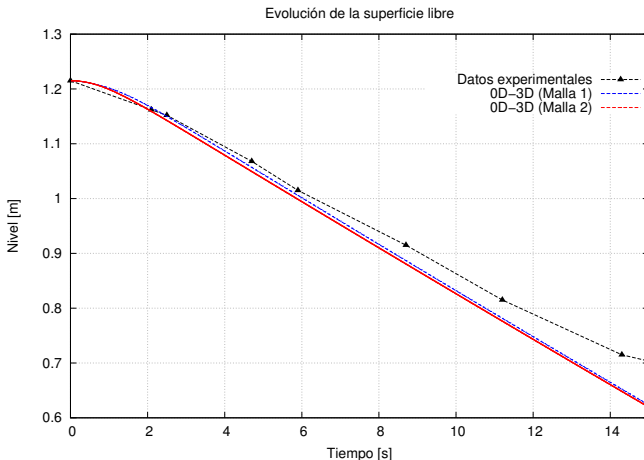
### Análisis de la descarga del SSP:



# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

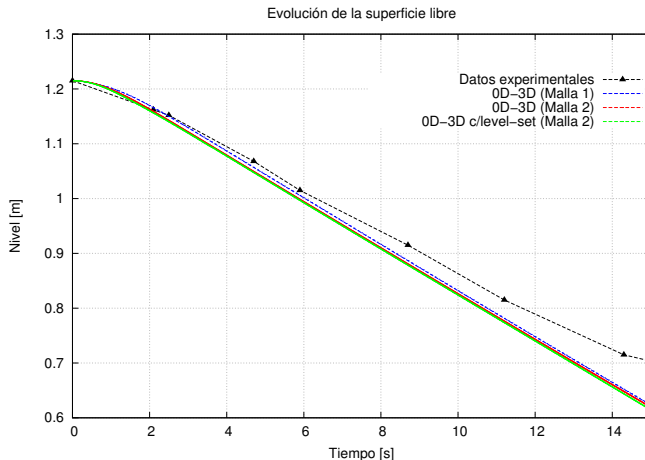
### Análisis de la descarga del SSP:



# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

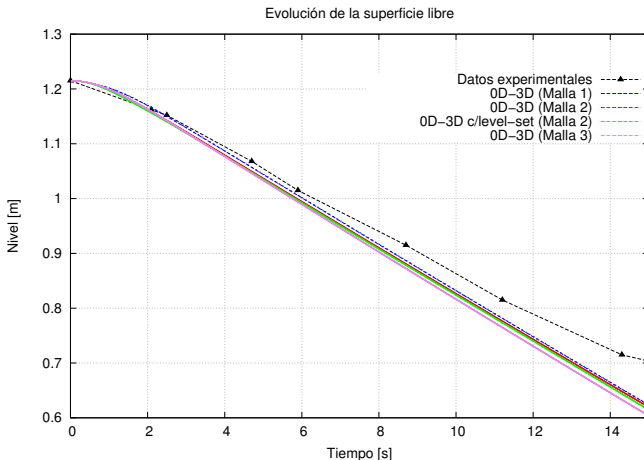
### Análisis de la descarga del SSP:



# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

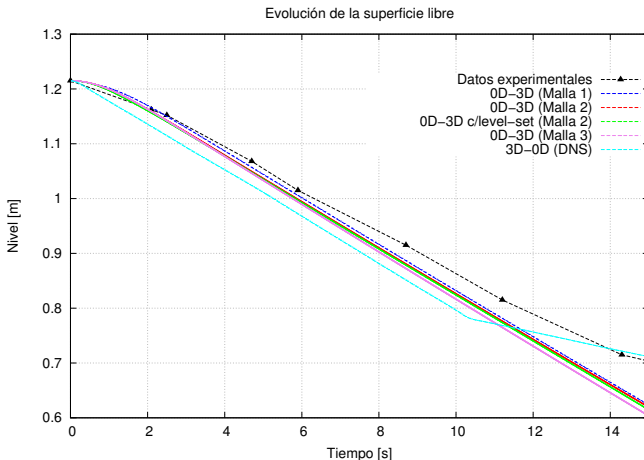
### Análisis de la descarga del SSP:



# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

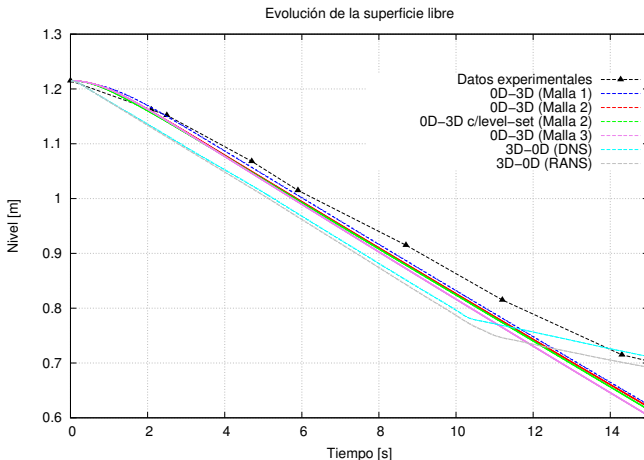
### Análisis de la descarga del SSP:



# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

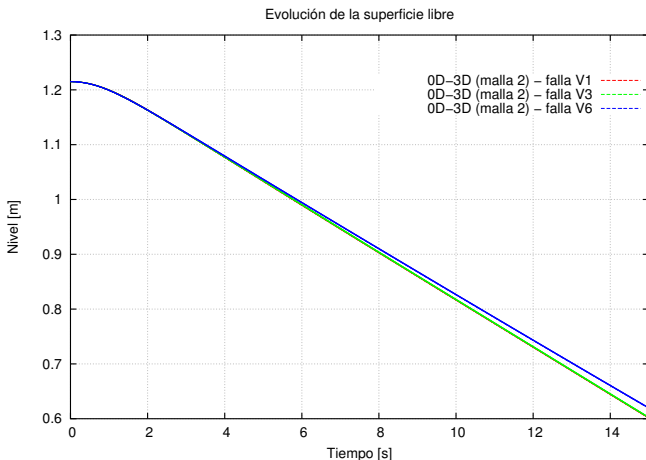
### Análisis de la descarga del SSP:



# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

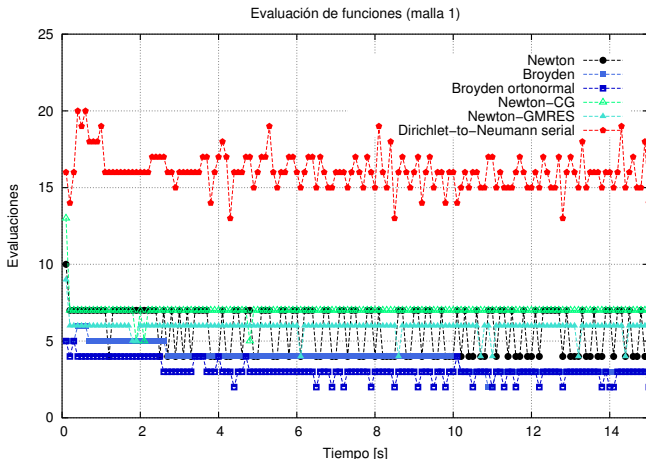
### Análisis de sensibilidad de resultados ante válvula en falla



# Ejemplos de aplicación

## Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

### Estudio de métodos numéricos para la resolución del sistema de residuos





# Outline

- 1 Introducción
  - Motivación
  - Abordaje del modelado
- 2 Estrategia de resolución
  - Paradigma maestro-esclavo
- 3 Ejemplos de aplicación
  - Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
  - Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
  - Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo
- 4 Conclusiones

## 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:







# 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











## Ejemplos de aplicación

## Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

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

## Ejemplos de aplicación

## 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

## Ejemplos de aplicación

## 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,  $\Sigma$  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

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.

## 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.
- 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

Estrategia de resolución:

- 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.

## Ejemplos de aplicación

## Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Estrategia de resolución:

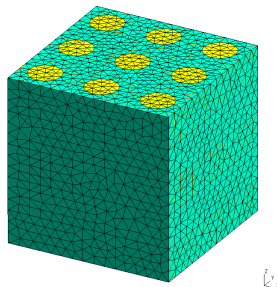
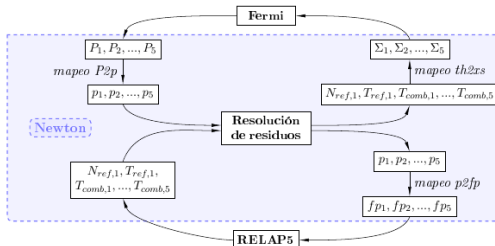
- El código neutrónico recibe como *guess* distribución de secciones eficaces y calcula distribución de potencia.
- El código termohidráulico recibe como *guess* distribución de potencias y calcula distribución de temperaturas y densidades.
- Las variables se acoplan en zonas físicas predefinidas.
- La evolución se discretiza en intervalos de 5 o 10 días.
- El valor del quemado inicial es  $B(\bar{x}) = 0$  en todo el dominio.



## Ejemplos de aplicación

## Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

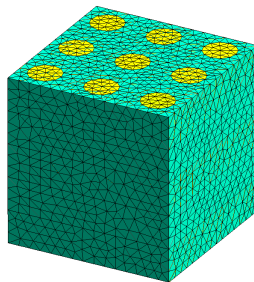
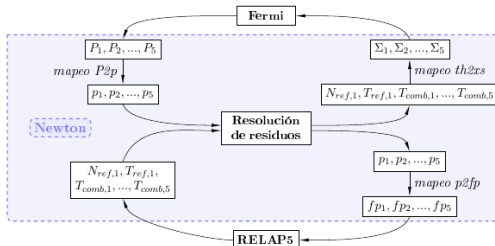
Acoplamiento de **Fermi** y **RELAP5** en modelo simple de núcleo:



## Ejemplos de aplicación

## Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

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



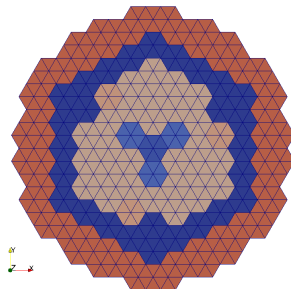
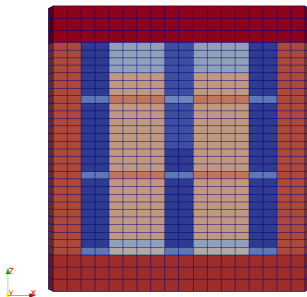
Método no lineal	$\Delta t$ [días]	Extrapolación de $\bar{x}^n$	Extrapolación de $J^n$	Evaluaciones totales	Tiempo total [s]
Broyden	10	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	85	610
Picard	10	$\mathcal{O}(1)$	-	68	684
Shamanskii	10	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(0)$	370	2663

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

## Ejemplos de aplicación

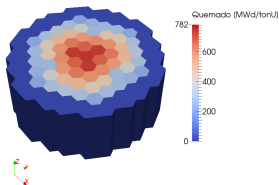
## Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

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

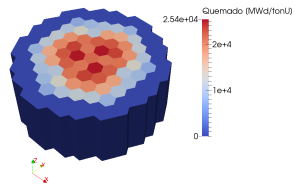


## Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

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



**Figura 3:  $t=10$  días**

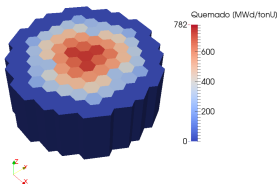


**Figura 4: t=400 días**

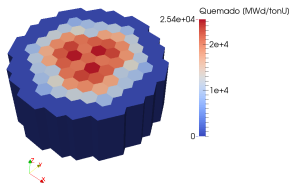
## Ejemplos de aplicación

## 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	$\Delta t$ [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.

# 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 resolución a cálculos no lineales acoplados genéricos (por ejemplo, acoplamiento neutrónico-termohidráulico).



# 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 resolución a cálculos no lineales acoplados genéricos (por ejemplo, acoplamiento neutrónico-termohidráulico).
- Desarrollo del código *Newton* que permite realizar acoplamientos de códigos de cálculo mediante paso de mensajes o manejo de archivos.

# Conclusiones

Trabajos futuros

# Conclusiones

## Trabajos futuros

- Estudios de dinámica de núcleo acoplando mayor cantidad de modelos



# 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!