Tesis de Maestría en Ingeniería

Acoplamiento multiescala en cálculos fluidodinámicos

Director

Dr. Dari, Enzo Alberto

Maestrando

Ing. Caccia, Federico Agustín

29 de septiembre de 2017





Introducción





- Introducción
- Estrategia de resolución





- Introducción
- Estrategia de resolución
- 3 Ejemplos de aplicación





- Introducción
- Estrategia de resolución
- Ejemplos de aplicación
- Conclusiones





••••• Outline

Introducción

- Introducción
 - 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







Motivación

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



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

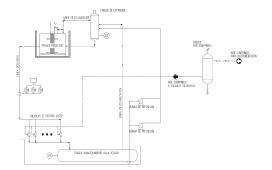


Figura 2: Esquema del Segundo Sistema de Parada del reactor RA-10.





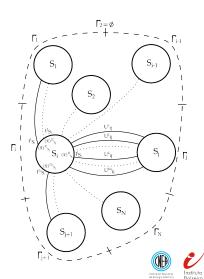
Introducción

- Introducción
 - 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





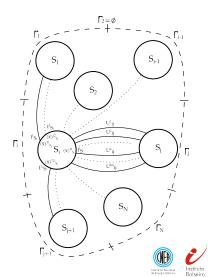






Abordaje del modelado

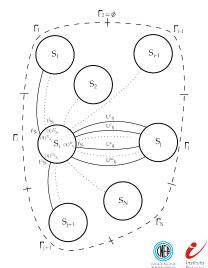
Desglosar en subsistemas





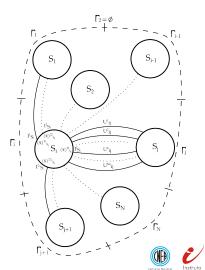
Abordaje del modelado

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



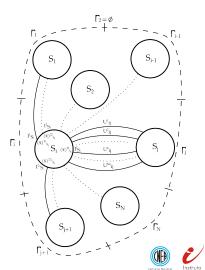


- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz (problemas elípticos)



Introducción Abordaje del modelado

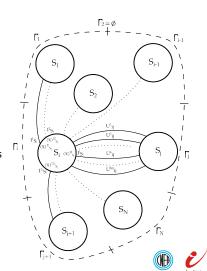
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz (problemas elípticos)
- Total de incógnitas: 2N





Introducción Abordaje del modelado

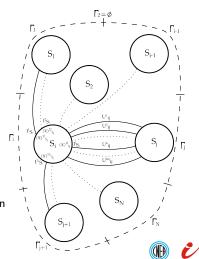
- Desglosar en subsistemas
- Identificar uniones que relacionan interfaces de acoplamiento
- Identificar pares de variables incógnitas en cada interfaz (problemas elípticos)
- Total de incógnitas: 2N
 - N ecuaciones de continuidad que relacionan las incógnitas entre dos interfaces contiguas de distintos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





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)

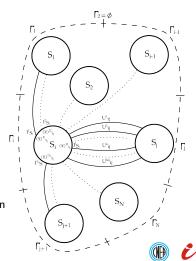






Introducción Abordaje del modelado

- 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)
- Seleccionar método numérico y resolver con acoplamiento fuerte





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:

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



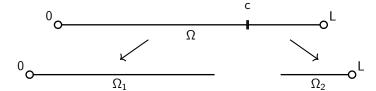






Abordaje del modelado: Ejemplo

• 1. Descomponer el dominio

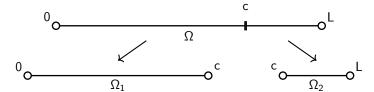








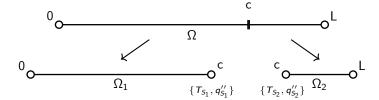
- 1. Descomponer el dominio
- 2. Reconocer interfaces de acople







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

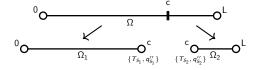








Abordaje del modelado: Ejemplo

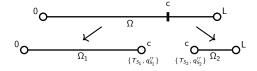


4. Ecuaciones de continuidad:

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





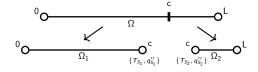


- 5. Ecuaciones modelos según condiciones de borde:
 - a. Selección de condiciones de borde:
 - S₁ condición de tipo Dirichlet (recibe T^{guess})
 - S₂ condición de tipo Neumann (recibe q''guess)









- 5. Ecuaciones modelos según condiciones de borde:
 - a. Selección de condiciones de borde:
 - S₁ condición de tipo Dirichlet (recibe T^{guess})
 - S₂ condición de tipo Neumann (recibe q''guess)
 - b. Selección de ecuaciones modelos:

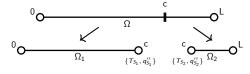
$$\begin{cases} (q''^{calc})_{S_1} = \mathscr{N}_1 ((T^{guess})_{S_1}) \\ (T^{calc})_{S_2} = \mathscr{D}_2 ((q''^{guess})_{S_2}) \end{cases}$$







Introducción



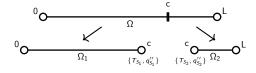
- 6. Seleccionar método numérico y resolver:
 - a. Métodos explícitos:
 - a1. Dirichlet − to − Neumann:

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









- 6. Seleccionar método numérico y resolver:
 - a. Métodos implícitos: Búsqueda de raíces de las ecuaciones de residuos:

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

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







Abordaje del modelado

Algunos métodos requieren evaluación de matriz jacobiana. Cada elemento $J_{ij}=rac{\partial r_i}{\partial x_i}$ puede aproximarse mediante diferencias finitas a primer orden como:

$$J_{ij} pprox rac{r_i(ar{x} + \Delta ar{x}^j) - r_i(ar{x})}{\|\Delta ar{x}^j\|}$$

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





Introducción Abordaje del modelado

Cuadro 1: Principales características de los métodos utilizados

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







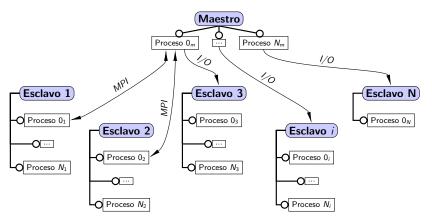
- - Motivación
 - Abordaje del modelado
- Estrategia de resolución
 - Paradigma maestro-esclavo
- - Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
 - Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
 - Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo







Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos Paradigma maestro-esclavo









Estrategia de resolución mediante acoplamiento de códigos

Esclavo 1 Maestro Esclavo 2 Creación de Creación de Creación de comunicadores comunicadores comunicadores (condiciones (condiciones $t_{e_1,0}$ iniciales) Cálculo de iniciales) $t_{e_2,0}$ $t_{coup,j}$ $x^{guess}(t_{coup,j+1})$ $y^{guess}(t_{coup,j+1})$ $x(y^{guess})$ Cálculo de residuos Convergencia? Continuar Reiniciar $t_{coup,j} = t_{coup,j} + \Delta t$ $t_{coup} < t_{coup,final}$ $t_{coup} \ge t_{coup,final}$ Liberación de Liberación de Liberación de comunicadores comunicadores comunicadores

Paradigma maestro esclavo









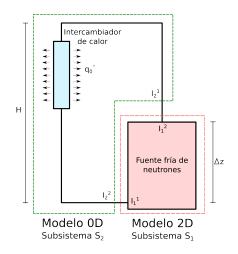
- - Motivación
 - Abordaje del modelado
- - Paradigma maestro-esclavo
- Ejemplos de aplicación
 - Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado
 - Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación
 - Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo







Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones









Ejemplos de aplicación

Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_1 :







Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_1 :

Parámetros utilizados: $\rho_0 = 163 \ \text{Kg/m}^3$ a la temperatura de referencia T_{ref} , $\mu = 2.8 \cdot 10^{-5}$ 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 $A_2^1 = A_2^2 = 0.03 m^2$.







Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_1 :

Parámetros utilizados: $\rho_0 = 163 \ \text{Kg/m}^3$ a la temperatura de referencia T_{ref} , $\mu = 2.8 \cdot 10^{-5}$ 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 $A_2^1 = A_2^2 = 0.03 m^2$.

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

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





Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Sistema S_2 :





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 $\epsilon = 0.5 \cdot 10^{-4} \ m$.







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.



Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Estrategia de resolución:

Ecuaciones de continuidad

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







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







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:
 - o 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







Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Ecuaciones de residuos en subsistema 1:

$$\begin{cases} (R_{p,Q})_{1}^{1} = p_{1}^{1,guess} - p_{1}^{1,calc}(Q_{1}^{1,guess}, T_{1}^{1,guess}, p_{1}^{2,guess}, q_{1}^{\prime\prime 2,guess}) \\ (R_{T,q''})_{1}^{1} = q_{1}^{\prime\prime 1,guess} - q_{1}^{\prime\prime 1,calc}(Q_{1}^{1,guess}, T_{1}^{1,guess}, p_{1}^{2,guess}, q_{1}^{\prime\prime 2,guess}) \\ (R_{p,Q})_{1}^{2} = Q_{1}^{2,guess} - Q_{1}^{2,calc}(Q_{1}^{1,guess}, T_{1}^{1,guess}, p_{1}^{2,guess}, q_{1}^{\prime\prime 2,guess}) \\ (R_{T,q''})_{1}^{2} = T_{1}^{2,guess} - T_{1}^{2,calc}(Q_{1}^{1,guess}, T_{1}^{1,guess}, p_{1}^{2,guess}, q_{1}^{\prime\prime 2,guess}) \end{cases}$$







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:

$$\begin{cases} (R_{p,Q})_{2}^{1} = Q_{2}^{1,guess} - Q_{2}^{1,calc}(p_{2}^{1,guess}, T_{2}^{1,guess}, p_{2}^{2,guess}, q_{2}^{\prime\prime2,guess}) \\ (R_{T,q''})_{2}^{1} = q_{2}^{\prime\prime1,guess} - q_{2}^{\prime\prime1,calc}(p_{2}^{1,guess}, T_{2}^{1,guess}, p_{2}^{2,guess}, q_{2}^{\prime\prime2,guess}) \\ (R_{p,Q})_{2}^{2} = Q_{2}^{2,guess} - Q_{2}^{2,calc}(p_{2}^{1,guess}, T_{2}^{1,guess}, p_{2}^{2,guess}, q_{2}^{\prime\prime2,guess}) \\ (R_{T,q''})_{2}^{2} = T_{2}^{2,guess} - T_{2}^{2,calc}(p_{2}^{1,guess}, T_{2}^{1,guess}, p_{2}^{2,guess}, q_{2}^{\prime\prime2,guess}) \end{cases}$$





Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

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

$$\left\{ \begin{array}{l} (R_{p,Q})_{1}^{1} = p_{1}^{1,guess} - p_{1}^{1,calc}(Q_{1}^{1,guess},T_{1}^{1,guess},p_{1}^{2,guess},q_{1}^{\prime\prime2,guess}) \\ (R_{T,q''})_{1}^{1} = q_{1}^{\prime\prime1,guess} - q_{1}^{\prime\prime1,calc}(Q_{1}^{1,guess},T_{1}^{1,guess},p_{1}^{2,guess},q_{1}^{\prime\prime2,guess}) \\ (R_{p,Q})_{1}^{2} = Q_{1}^{2,guess} - Q_{1}^{2,calc}(Q_{1}^{1,guess},T_{1}^{1,guess},p_{1}^{2,guess},q_{1}^{\prime\prime2,guess}) \\ (R_{T,q''})_{1}^{2} = T_{1}^{2,guess} - T_{1}^{2,calc}(Q_{1}^{1,guess},T_{1}^{1,guess},p_{1}^{2,guess},q_{1}^{\prime\prime2,guess}) \end{array} \right.$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} (R_{p,Q})_{2}^{1} = Q_{2}^{1,guess} \quad Q_{2}^{1,calc}(p_{2}^{1,guess},T_{2}^{1,guess},p_{2}^{2,guess},q_{2}^{\prime\prime2,guess}) \\ (R_{T,q''})_{2}^{1} = q_{2}^{\prime\prime1,guess} - q_{2}^{\prime\prime1,calc}(p_{2}^{1,guess},T_{2}^{1,guess},p_{2}^{2,guess},q_{2}^{\prime\prime2,guess}) \\ (R_{p,Q})_{2}^{2} = Q_{2}^{2,guess} - Q_{2}^{2,calc}(p_{2}^{1,guess},T_{2}^{1,guess},p_{2}^{2,guess},q_{2}^{\prime\prime2,guess}) \\ (R_{T,q''})_{2}^{2} = T_{2}^{2,guess} - T_{2}^{2,calc}(p_{2}^{1,guess},T_{2}^{1,guess},p_{2}^{2,guess},q_{2}^{\prime\prime2,guess}) \end{array} \right.$$





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	$\Delta T [K]$	$Q[m^3/s]$	Δp [Pa]
	1	3.4	0.7	$3,2 \cdot 10^{-3}$	613
$2 \cdot 10^4$	5	1	0.5	$4,2 \cdot 10^{-3}$	614
	10	0.5	0.3	$4,5 \cdot 10^{-3}$	617
	1	6.5	3.6	$4,4 \cdot 10^{-3}$	595
$2\cdot 10^5$	5	1.7	2.8	$7,6 \cdot 10^{-3}$	605
	10	0.9	2.2	$9.0\cdot10^{-3}$	620
	1	10.6	24	$8,9 \cdot 10^{-3}$	465
$2\cdot 10^6$	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.



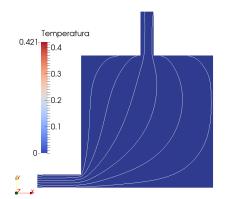




Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Distintos comportamientos según el Ri obtenido:

• Ri = 0.8:





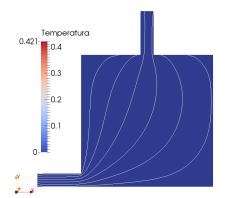




Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

Distintos comportamientos según el Ri obtenido:

• Ri = 84:



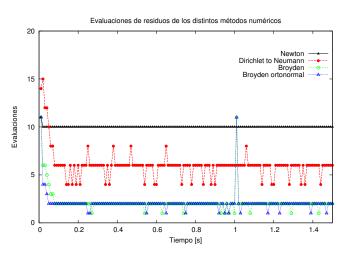






Ejemplos de aplicación Fluidodinámica en una fuente fría de neutrones

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









- - Motivación
 - Abordaje del modelado
- - Paradigma maestro-esclavo
- 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

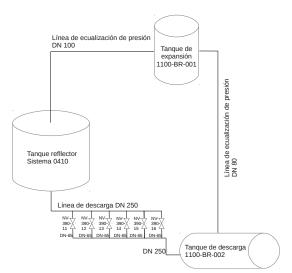






Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

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



















Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Subdominios de análisis:

Subsistema del tanque del reflector,







Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

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







Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

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





Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

- 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.







Subsistema 0-D:

$$\ddot{h}h + rac{\dot{h}^2}{2}\left(1 - \left(rac{A_T}{A_D}
ight)^2
ight) + g\Delta h_{red} + \ddot{h}I_D = rac{p_{atm} - p_1^1}{
ho} + \Delta \hat{u}$$

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, I_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:

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

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







Parámetro	Valor		
A_T	5.30 <i>m</i> ²		
A_D	$0.05 m^2$		
Δh_{red}	$h + 4.98 \ m$		
I_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







Subsistema 3-D:

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

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 $c_{\epsilon} = 0.07$ [?].







Estrategia de resolución:

• Elección de variables: $\{p, Q\}$







Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Estrategia de resolución:

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

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







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







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:

$$\left\{ \begin{array}{l} (R_{p,Q})_{1}^{1} = Q_{1}^{1,guess} - Q_{1}^{1,calc}(\rho_{1}^{1,guess}) \\ (R_{p,Q})_{2}^{1} = \rho_{2}^{1,guess} - \rho_{2}^{1,calc}(Q_{2}^{1,guess}) \end{array} \right.$$

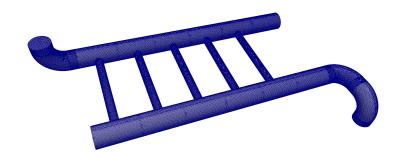






Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

Transporte de superficie libre en cañerías

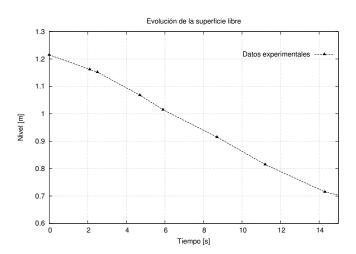








Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación



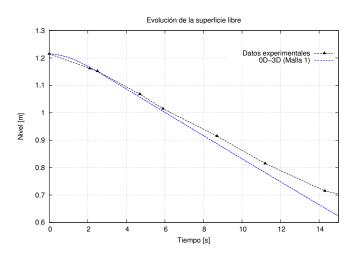








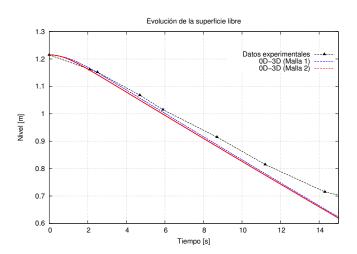
Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación







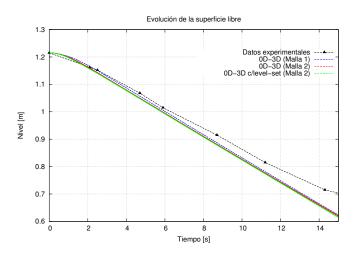










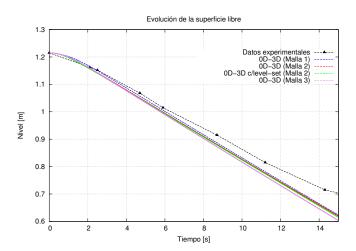








Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación



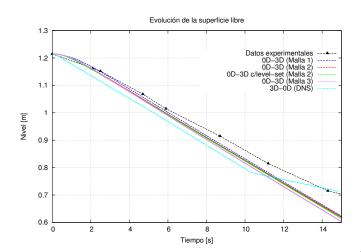








Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

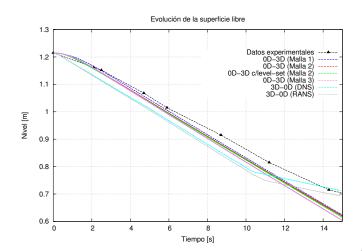








Análisis del segundo sistema de parada de un reactor de investigación

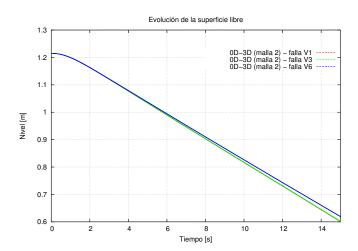








Análisis de sensibilidad de resultados ante válvula en falla

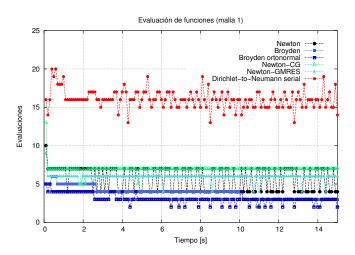








Estudio de métodos numéricos para la resolución del sistema de residuos









- - Motivación
 - Abordaje del modelado
- - Paradigma maestro-esclavo
- 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







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:

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







Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

- 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

- Las variables de acople no necesariamente deben corresponder a condiciones de borde
- Las variables de acople no necesariamente deben agruparse en pares Objetivo: Modelar la dinámica del núcleo de un reactor nuclear mediante acoplamiento de códigos que resuelvan diferentes fenómenos físicos:





Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

- 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







- 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







- 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

- 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







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

Otros

- 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:







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

No hay movimiento de barras







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







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

- No hay movimiento de barras
- No se modela comportamiento de materiales
- Las secciones eficaces neutrónicas están condensadas por zonas y grupos de energía en previos cálculos de celda, y tienen dependencia con el quemado y con variables termohidráulicas





Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Modelo neutrónico:

Cálculo de fluio neutrónico:

$$\Deltaar{\phi} = rac{1}{k_{\it eff}} \Sigmaar{\phi}$$

donde $\bar{\phi}$ 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 keff es el factor de multiplicación del reactor.





Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Modelo neutrónico:

Cálculo de fluio neutrónico:

$$\Delta ar{\phi} = rac{1}{k_{\it eff}} \Sigma ar{\phi}$$

donde $ar{\phi}$ 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 keff es el factor de multiplicación del reactor.

Cálculo de secciones eficaces:

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

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 guemado del material [?].







Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Modelo neutrónico:

Cálculo de fluio neutrónico:

$$\Delta ar{\phi} = rac{1}{k_{\it eff}} \Sigma ar{\phi}$$

donde $\bar{\phi}$ 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:

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

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 guemado del material [?]. Cálculo de distribución de potencia:

$$P = \int_{vol} E_{fis,i} \Sigma_{fis,i} \phi_i$$

donde $E_{\mathit{fis.}i}$ es la energía liberada por fisiones ocurridas en el rango de energía $i, \Sigma_{\mathit{fis.}i}$ es la sección eficaz de fisión condensada en el grupo de energía i y ϕ_i es la componente del flujo neutrónico también condensada en el grupo de energía i.







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.







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.

La transferencia de calor a través de las estructuras de combustibles se estudia con un modelo de difusión.







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.

La transferencia de calor a través de las estructuras de combustibles se estudia con un modelo de difusión.

El modelo termohidráulico del refrigerante considera ecuaciones de mezcla del fluido en fases líquida y gaseosa:

- 2 Ecuaciones de continuidad;
- 2 Ecuaciones de momento unidimensionales;
- 2 Ecuaciones de conservación de energía.













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 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.







- 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.







- 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 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.







- 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.
- En cada intervalo temporal se actualiza el valor de B por zonas físicas, considerando la distribución de potencias constante.

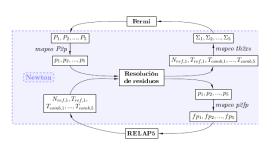


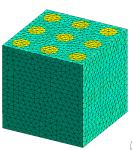




Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Acoplamiento de Fermi y RELAP5 en modelo simple de núcleo:





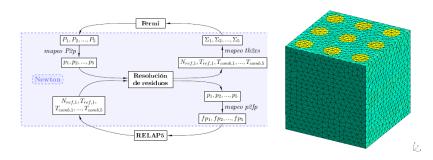






Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

Acoplamiento de Fermi y RELAP5 en modelo simple de núcleo:



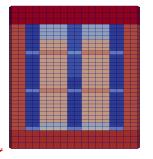
Método	Δt	Extrapolación	Extrapolación	Evaluaciones	Tiempo
no lineal	[días]	$de \bar{x}^n$	$de J^n$	totales	total [s]
Broyden	10	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	85	610
Picard	10	$\mathcal{O}(1)$		68	684
Shamanskii	10	$\mathcal{O}(1)$	$\mathscr{O}(0)$	370	2663

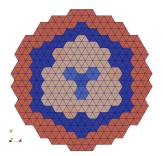
Cuadro 4: Evaluaciones totales y tiempo total requerido por cada método no lineal





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











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

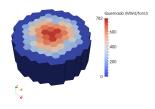


Figura 3: t=10 días

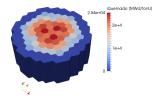


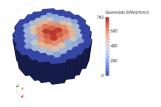
Figura 4: t=400 días





Extensión a problemas acoplados en modelos de núcleo

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



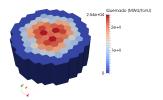


Figura 3: t=10 días

Figura 4: t=400 días

Método	Δt	Extrapolación	Evaluaciones	Tiempo
no lineal	[días]	de \bar{x}^n	totales	total [s]
Picard	5	 Ø (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	$\mathscr{O}(1)$	107	3919















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







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







- 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.







- 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.







- 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 análsis del SSP del RA-10.







- 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 análsis del SSP del RA-10.
- En general el método de *Broyden* arrojó los mejores resultados.





- 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 análsis 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).







- 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 análsis 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 archimos











• Estudios de dinámica de núcleo acoplando mayor cantidad de modelos







- 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







- 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!



