

TESIS CARRERA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA

**ACOPLAMIENTO MULTIESCALA EN CÁLCULOS
FLUIDODINÁMICOS**

Ing. Federico Agustín Caccia
Maestrando

Dr. Enzo Dari
Director

Miembros del Jurado

Dr.F. Teruel (Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo)
Dr.P. Zanocco (Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo)

9 de Julio de 2017

Departamento de Mecánica Computacional – Centro Atómico
Bariloche

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina

A todos aquellos que cuestionan lo incuestionable

Índice de símbolos

CFD: Fluidodinámica Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)

DNS: Simulación numérica directa (*Direct Numerical Simulation*)

FEM: Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method*)

PDE: Ecuación con Derivadas Parciales (*Partial Differential Equation*)

RANS: Promedio de Reynolds de Navier-Stokes (*Reynolds-Averaged Navier–Stokes*)

Índice de contenidos

Índice de símbolos	v
Índice de contenidos	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xi
Resumen	xiii
Abstract	xv
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Abordaje del modelado	2
1.2.1. Desglosado del sistema original en subsistemas acoplados	2
1.2.2. Sistema de ecuaciones a resolver	3
1.2.3. Métodos numéricos para la resolución de sistemas de ecuaciones de residuos	4
1.2.4. Problemas de evolución temporal	7
1.3. Objetivos y estructura de trabajo	7
2. Técnicas de acoplamiento	9
2.1. Paradigma maestro-esclavo	9
2.2. Códigos maestros utilizados	9
2.3. Formas de comunicación implementadas	9
2.4. Arquitectura de acoplamiento montada en códigos esclavos	9
3. Modelos fluidodinámicos utilizados	11
3.1. Modelos en Par-GPFEP	11
3.2. Modelos en Relap	11
3.3. Otros modelos cero-dimensionales	11

4. Aplicaciones en cálculos fluidodinámicos acoplados	13
4.1. Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado	13
4.2. Análisis del segundo sistema de parada del reactor RA-10	13
4.3. Resolución de grandes redes hidráulicas	13
5. Extensión al problema neutrónico-termohidráulico	15
5.1. Descripción del código Newton	15
5.2. Acople neutrónico-termohidráulico	15
A. Formulación de las ecuaciones fluidodinámicas de PAR-GPFEP con el método de elementos finitos	17
B. Métodos de resolución de sistemas de ecuaciones no lineales	19
Bibliografía	21
Publicaciones asociadas	23
Agradecimientos	25

Índice de figuras

1.1. Esquema de descomposición disjunta de dominios	3
1.2. Descomposición en barra unidimensional	5

Índice de tablas

Resumen

Los análisis de ingeniería actuales exigen estudios en sistemas cada vez más complejos. Éstos, a su vez, involucran subsistemas de características disímiles: principalmente diferentes tamaños y parámetros característicos. Por ejemplo, en los sistemas termohidráulicos es posible identificar distintos regímenes de flujo en tanques o en cañerías. En ciertas ocasiones solo es de interés el detalle en algunos componentes, necesitando modelar el resto del sistema para conservar la dinámica global. En este trabajo se estudia una técnica que permite acoplar el modelado detallado de sistemas fluídicos bi- y tri- dimensionales con sistemas fluídicos más sencillos uni-dimensionales o cero-dimensionales. Cada subsistema se halla acoplado a los demás mediante los valores que toman las variables en las interfaces que comparten entre sí. El problema a resolver se reduce entonces a un sistema de ecuaciones cuyo tamaño depende de la cantidad de incógnitas en cada interfaz. Estas ecuaciones dependen, a su vez, de la física de cada subsistema y en general resultan ser no lineales. Debido a esta característica, se investigan diferentes métodos de resolución iterativa. Sobre el final del trabajo se extiende la técnica a acoples multifísicos y se muestran algunos ejemplos de acoplamiento neutrónico-termohidráulico.

Palabras clave: ACOPLAMIENTO FUERTE, MODELADO MULTIESCALA, FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL, MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, ACOPLAMIENTO NEUTRÓNICO-TERMOHIDRÁULICO.

Abstract

Current engineering analyzes require studies in increasingly complex systems. These, in turn, involve subsystems of dissimilar characteristics: mainly different sizes and characteristic parameters. For example, in thermohydraulic systems it is possible to identify different flow regimes in tanks or pipelines. On some occasions it is only interesting to detail in some components, needing to model the rest of the system to preserve the global dynamics. In this work we study a technique that allows the coupling of the detailed modeling of bi- and three-dimensional fluidic systems with simplified one-dimensional or zero-dimensional fluidic systems. Each subsystem is coupled to the others by the values that the variables take on the interfaces they share with each other. The problem to be solved is then reduced to a system of equations whose size depends on the number of unknowns in each interface. These equations, in turn, depend on the physics of each subsystem and in general turn out to be non-linear. Due to this characteristic, different iterative resolution methods are investigated. On the end of the work the technique is extended to multiphysical couplings and some examples of neutron-thermohydraulic coupling are shown.

Keywords: STRONG COUPLING, MULTISCALE MODEL, COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS, FINITE ELEMENT METHOD, NEUTRONIC-TERMAL-HYDRAULIC COUPLINGS

Capítulo 1

Introducción

“Don’t get involved in partial problems, but always take flight to where there is a free view over the whole single great problem, even if this view is still not a clear one.”

— Ludwig Wittgenstein, 1889-1951

1.1. Motivación

La creciente sofisticación en los análisis de ingeniería demanda el estudio de sistemas cada vez más complejos. Un ejemplo actual de esto es el modelado de grandes componentes termohidráulicos de geometría muy compleja en la industria nuclear. Es notable la presencia de subsistemas de características muy diferentes: principalmente diferentes tamaños y regímenes de flujos. Si bien se necesita modelar y entender el sistema completo, solo es de interés el detalle en algunos subsistemas. Algunos, como las tuberías, se hallan muy bien caracterizados por modelos simple (ODE's). Otros, en cambio, requieren un análisis detallado de flujo, y por ello es necesaria la simulación fluidodinámica computacional (CFD).

En este marco se justifica el desarrollo de una técnica numérica que permita desglosar el problema general para analizar cada subsistema por separado mediante condiciones de borde dinámicas. Como referencia a este enfoque se citan los trabajos desarrollados por J. S. Leiva y G. C. Buscaglia (2006) [1], P.J. Blanco et al. (2010) [2] y J. S. Leiva et al. (2011) [3].

1.2. Abordaje del modelado

1.2.1. Desglosado del sistema original en subsistemas acoplados

Dado un sistema S en un dominio Ω con borde Γ , es posible desglosar este dominio en N particiones y analizar diferentes subsistemas $S_i, i = 1, \dots, N$ por separado, acoplados entre sí mediante condiciones de borde en las uniones (método de descomposición disjunta de dominios [4]). Las condiciones de borde originales del problema, impuestas sobre la curva Γ , ahora se imponen sobre cada fragmento de la curva. La Figura 1.1 presenta el esquema propuesto. La notación utilizada es la siguiente:

- S_i representa al subsistema $i, i = 1, \dots, N$.
- $U_{i,j}^k$ es la unión k entre subsistemas i y $j, k = 1, \dots, K_{i,j}$.
- $I_{S_i}^l$ es la interfaz local l del subsistema $i, l = 1, \dots, L_i$.
- Γ_i es la porción de frontera exterior en el subsistema $N, \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \dots \cup \Gamma_i \dots \cup \Gamma_N = \Gamma$. Notar que Γ_j puede ser nula para algún S_j .
- $(x_m)_{S_i}^{I_l}$ es el valor de la variable x_m en la interfaz l del subsistema $i, m = 1, \dots, M_i$.
- $(\bar{x})_{S_i}^{I_l}$ es el vector de incógnitas $\{x_1, x_2, \dots, x_{M_i}\}$ en la interfaz l del subsistema i .

En principio, existen tantas incógnitas como valores de variables en cada interfaz. Sin embargo, es posible notar que la unión $U_{i,j}^k$ que relaciona los sistemas S_i y S_j mediante las interfaces $I_{S_i}^{l_1}$ e $I_{S_j}^{l_2}$ respectivamente, define una relación de continuidad¹ entre las incógnitas $(x_m)_{S_i}^{I_{l_1}}$ y $(x_m)_{S_j}^{I_{l_2}}$, de tal forma que:

$$(x_m)_{S_i}^{I_{l_1}} = (x_m)_{S_j}^{I_{l_2}} \quad (1.1)$$

Estas relaciones reducen a la mitad la cantidad de incógnitas. Las demás ecuaciones se encuentran a partir del modelo de estudio de cada subsistema. Sean $(F_m)_i^l$ las relaciones funcionales que calculan el valor de las incógnitas $(x_m)_{S_i}^{I_l}$ en la interfaz l del subsistema i , a partir del valor de otras incógnitas y de los datos de contorno sobre la frontera exterior Γ_i :

$$(x_m)_{S_i}^{I_l} = (F_m)_i^l \left((\bar{x})_{S_i}^{I_1}, (\bar{x})_{S_i}^{I_2}, \dots, (\bar{x})_{S_i}^{I_{L_i}}, (\alpha_i(\Gamma_i)) \right) \quad (1.2)$$

¹ Las incógnitas que representan derivadas normales en la interfaz de acople pueden tomar signos opuestos según la convención. Por ejemplo, si el flujo de calor es una incógnita, y se define como flujo positivo a aquel que es saliente del subsistema, entonces la condición de continuidad implicará que:

$$(q'')_{S_i}^{I_{l_1}} = -(q'')_{S_j}^{I_{l_2}}$$

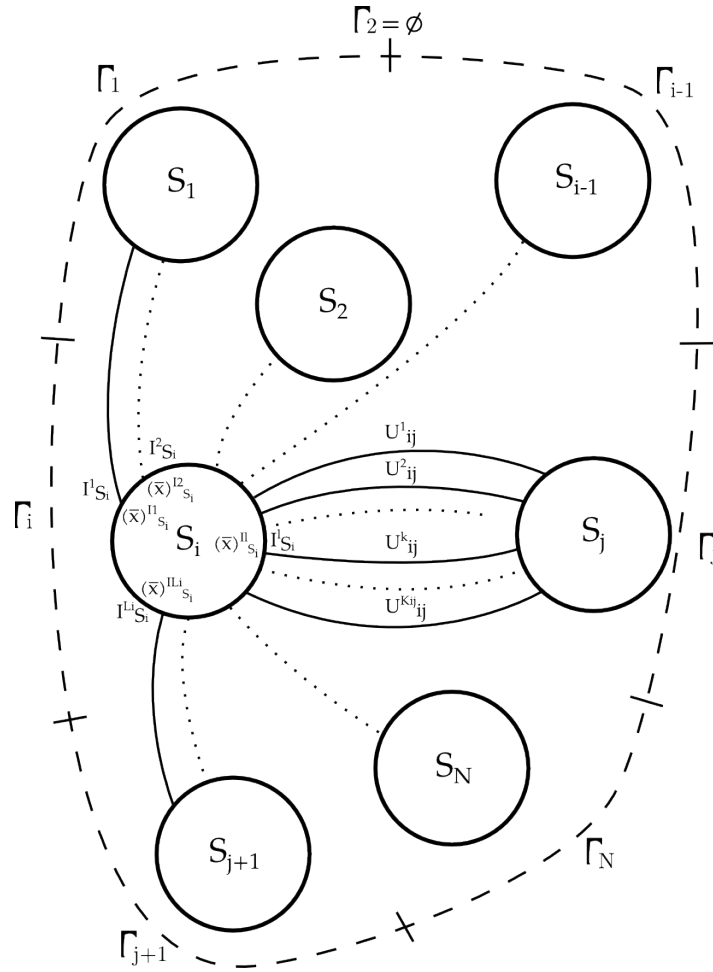


Figura 1.1: Esquema de subsistemas de estudio relacionados mediante condiciones de borde dinámicas en interfaces de acoplamiento.

donde $(\alpha_i(\Gamma_i))$ representa las condiciones de borde impuestas sobre la curva Γ_i . Notar que algunas de las dependencias pueden anularse dependiendo del modelo de estudio utilizado en cada subsistema ².

1.2.2. Sistema de ecuaciones a resolver

Restando el lado derecho en (1.2) a ambos lados, se obtienen relaciones del tipo:

$$(R_m)_i^l = (x_m)_{S_i}^{I_l} - (F_m)_i^l \left((\bar{x})_{S_i}^{I_1}, (\bar{x})_{S_i}^{I_2}, \dots, (\bar{x})_{S_i}^{I_{L_i}}, (\alpha_i(\Gamma_i)) \right) \quad (1.3)$$

para cada residuo en la incógnita m de cada interfaz l del subsistema i . Debido a las relaciones de continuidad (1.1), es posible descartar ecuaciones, seleccionándolas de tal

² Cuando la expresión es más sencilla y solo involucra el valor de otro tipo de condición de borde en la misma interfaz, la relación funcional recibe el nombre de operador *Steklov-Poincaré*. En matemática, el operador *Steklov-Poincaré* mapea el valor de una condición de borde de una PDE elíptica en un dominio al valor de otra condición de borde (por ejemplo, una condición de borde de tipo *Dirichlet* en una condición de borde de tipo *Neumann*). Usualmente, cualquiera de las dos condiciones determinan la solución.

forma que el sistema de ecuaciones en cada subsistema quede bien planteado, como se explica más adelante. La convergencia fuerte de los subsistemas acoplados necesita que los residuos sean nulos. El sistema global de ecuaciones restante se reduce a la siguiente expresión:

$$\bar{R} = \bar{0} \quad (1.4)$$

donde \bar{R} es el vector de residuos de las ecuaciones seleccionadas. En general estas relaciones son no lineales, y por lo tanto se resuelven de forma iterativa, a partir de un primer vector solución propuesto. Debido a que en cada subsistema solo han sobrevivido ciertas relaciones funcionales, van a tomar como dato solo algunos de estos valores propuestos. Es necesario por tanto seleccionar las ecuaciones de modo que el problema resulte bien planteado. Por ejemplo, si interesara calcular el campo de temperaturas en un subsistema dado, serían incógnitas la temperatura y el flujo de calor en cada una de sus interfaces. Sin embargo ambas no pueden ser impuestas como dato en el mismo subsistema. En general, cada subsistema debe recibir condiciones o bien de tipo *Dirichlet*, o bien de tipo *Neumann*, para cada ecuación.

1.2.3. Métodos numéricos para la resolución de sistemas de ecuaciones de residuos

Existen diferentes estrategias para hallar las raíces del sistema (1.4). La forma clásica es el conocido método *Dirichlet-to-Neumann*, que resuelve mediante iteraciones de tipo *Piccard*. La ventaja de este método es que es sencillo de implementar, ya que es un método explícito y por tanto, los valores calculados por algún subsistema son inmediatamente impuestos como condición de borde a otros subsistemas. Sin embargo, tiene algunas desventajas. Por ejemplo, las condiciones de borde que son datos en cada subsistema no pueden elegirse arbitrariamente. Las interfaces $I_{S_i}^{l_1}$ y $I_{S_j}^{l_2}$ comunes a cada unión $U_{i,j}^k$ deben alternar condiciones de borde de tipo *Dirichlet* y de tipo *Neumann* para las ecuaciones que relacionan las mismas variables de estado en cada subsistema.

El siguiente ejemplo esclarece lo expresado. Se desea resolver la ecuación de calor con condiciones de borde homogéneas, para encontrar el campo de temperaturas u en una barra unidimensional de longitud L , fuente interna de energía f y conductividad térmica k :

$$\begin{cases} -k\Delta u = f \\ u|_{\partial\Omega} = 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

mediante el método de descomposición disjunta de dominios (ver Figura 1.2. El dominio original $[0, L]$ es particionado en los subdominios $[0, c]$ y $[c, L]$. Para que cada problema

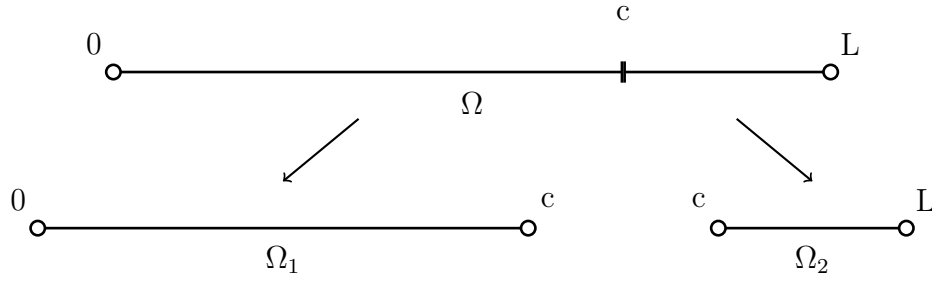


Figura 1.2: Descomposición disjunta de dominios en el cálculo del campo de temperatura a lo largo de una barra unidimensional.

quede bien planteado es necesario imponer una condición de borde extra en el punto de interfaz a cada lado. En el método *Dirichlet-to-Neumann*, es necesario decidir qué subsistema va a resolverse en primera instancia, a partir de algún valor supuesto en el borde. Si arbitrariamente se decidiera imponer una temperatura (condición *Dirichlet* al borde del primer subsistema, luego de realizar el cálculo de temperaturas quedaría definido un flujo calórico a través de su interfaz de conexión con el segundo subsistema. Este valor de flujo luego debe ser utilizado para imponerse como condición de borde al segundo subsistema, en el cuál se resolverá el campo de temperaturas y quedará definida una nueva temperatura en la interfaz de acople. Esta temperatura se impone nuevamente al primer subsistema, y el cálculo continúa así hasta que los sucesivos valores de las variables acopladas convergan. Si inicialmente se hubiera impuesto una condición de *Neumann* en el primer subdominio, necesariamente al segundo subdominio debe imponérsele una condición de *Dirichlet*. Es decir, al utilizar el método *Dirichlet-to-Neumann*, la elección de un tipo de frontera en un subdominio dado determina el tipo de frontera en el subdominio contiguo, para las ecuaciones que relacionan las mismas variables de estado en ambos subsistemas. Otra desventaja de este método es que en general requiere demasiadas iteraciones para converger [5]. En algunos problemas el método puede quedar estancado, iterando en series de valores que se repiten en ciclo. Y en otros casos el método es divergente (sin ir más allá, para un cierto conjunto de parámetros del problema ejemplo analizado, el método diverge, ver [6]).

Otra forma de resolver el problema es aplicando métodos para encontrar raíces a funciones vectoriales no lineales (sistema de ecuaciones de residuos 1.4 en función de las variables de acople incógnitas), como por ejemplo, el método *Newton-Raphson*. Haciendo un desarrollo de Taylor de las ecuaciones de residuos alrededor del punto \bar{x}_n , truncando los términos superiores al primer orden, y evaluando en $x = x_{n+1}$ se tiene:

$$\bar{R}(\bar{x}) = \bar{R}(\bar{x}_n) + \nabla \bar{R}(\bar{x}_n)(\bar{x}_{n+1} - \bar{x}_n) \quad (1.6)$$

donde $\nabla \bar{R}(\bar{x}_n)$ es la matriz jacobiana del sistema J evaluada en el punto \bar{x}_n , donde el elemento J_{ij} debe evaluarse como $J_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial x_j}$. Suponiendo que x_{n+1} tiende a la raíz

buscada se ha de cumplir que $\bar{R}(\bar{x}_{n+1}) = 0$. Sustituyendo en 1.6 y operando algebraicamente se llega a la siguiente expresión:

$$\bar{R}(\bar{x}_n) = -J(\bar{x}_n)(\bar{x}_{n+1} - \bar{x}_n) \quad (1.7)$$

que es el método de iterativo *Newton–Raphson* con orden de convergencia cuadrática. Para hallar la solución \bar{x}_{n+1} simplemente hay que resolver el sistema:

$$\bar{x}_{n+1} = \bar{x}_n - J^{-1}(\bar{x}_n)\bar{R}(\bar{x}_n) \quad (1.8)$$

El problema es que para utilizar este método se requiere la construcción de la matriz jacobiana en cada iteración, lo cual es demasiado costoso. Una sencilla aproximación mediante diferencias finitas de primer orden de cada elemento de la matriz jacobiana requiere numerosas ejecuciones de códigos clientes ³. Si bien estas evaluaciones son independientes entre sí y por lo tanto altamente paralelizables, este método es excesivamente costoso.

Una forma alternativa y elegante de resolver el sistema de ecuaciones planteado en 1.4 es mediante métodos *cuasi-Newton*. Estos métodos tienen convergencia superlineal [7], y por lo tanto presentan una ventaja frente a los métodos mediante iteraciones de *Piccard*. La característica principal de estos métodos es que aproximan la matriz jacobiana sin necesidad de realizar evaluaciones extras, y por lo tanto tienen también un punto de ventaja frente al método de *Newton–Raphson*. El método de *Broyden* es uno de ellos [8]. También existe otra variante del método, el método *Broyden ortonormal*, que asegura la convergencia en N iteraciones para sistemas lineales (XXX), donde N es la dimensión de la matriz jacobiana.

Existe también un conjunto de métodos conocidos como métodos *Newton–Krylov* para la resolución del sistema 1.4. Estos métodos no requieren el cálculo de matriz jacobiana ya que resuelven el sistema mediante gradientes descendientes, gradientes conjugados y otras técnicas que también serán exploradas en el presente trabajo. Sin embargo, en cada paso de descenso requieren evaluaciones de residuos, y por tanto son altamente costosos.

³ Cada elemento $J_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial x_j}$ puede aproximarse mediante diferencias finitas a primer orden como:

$$J_{ij} \approx \frac{R_i(x_j + \Delta x_j) - R_i(x_j)}{\Delta x_j} \quad (1.9)$$

La construcción de la matriz jacobiana con éste método requiere una evaluación del vector residuo \bar{R} en el punto \bar{x} y luego N evaluaciones extras, donde N es la cantidad de incógnitas. Es decir, en total, se requieren $N + 1$ ejecuciones de cada código cliente.

1.2.4. Problemas de evolución temporal

En problemas de avance temporal la estrategia de selección de variables que son datos o incógnitas en cada interfaz puede variar en la evolución. Cabe resaltar también que no existe necesidad de que los cálculos en cada subsistema utilicen el mismo paso temporal. Cualquiera de los códigos podría utilizar subdivisiones del paso temporal del otro código, y establecer el acople sólo en pasos de tiempo determinados. Los valores para las condiciones de borde dinámicas entre los pasos de tiempo en los que efectivamente se intercambian datos, pueden interpolarse con valores previos.

Notar que la herramienta es incondicionalmente estable debido a que en cada paso de tiempo se asegura la convergencia fuerte de los valores de las variables en las interfaces de acople.

1.3. Objetivos y estructura de trabajo

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

Implementar el acoplamiento fuerte entre modelos dimensionalmente heterogéneos, resolviendo cada subdominio por separado con códigos particulares, e imponiendo la interacción entre ellos sólo mediante condiciones de borde.

La estructura de la tesis es detallada a continuación. En el presente capítulo se han planteado las ecuaciones que surgen al dividir sistemas complejos mediante interfaces con condiciones de borde dinámicas, y se han presentado alternativas numéricas para la resolución de las mismas. En el Capítulo 2 se describen las diferentes formas de implementar el acoplamiento entre códigos que han sido investigadas e implementadas. En el Capítulo 3 se presentan los distintos códigos utilizados para realizar cálculos fluidodinámicos, se comentan sus modelos matemáticos y las implementaciones realizadas en ellos para efectuar acoplamientos. En el Capítulo 4 se muestran algunas aplicaciones de la herramienta estudiada. La primera es un sistema fluídico cerrado que se estudia subdividiéndolo en dos subsistemas, con dos interfaces de acople cada uno. El movimiento del fluido está gobernado por fuerzas naturales y por lo tanto interesa acoplar variables de caudal, presión, temperatura y flujo de calor en cada interfaz. El siguiente sistema de estudio es el vaciado del tanque reflector del reactor de investigación RA-10. Interesa analizar los tiempos de descarga ya que el mismo es diseñado como Segundo Sistema de Parada (SSP). Se abordan distintos modelos multiescala del mismo, para estudiar el detalle fluídico tridimensional en un componente del sistema, acoplando con condiciones de borde dinámicas a modelos cero-dimensionales que representan el resto del sistema. Al final del capítulo se presenta un estudio de redes hidráulicas con

múltiples componentes, para demostrar la eficiencia de la herramienta en acoples de mayor escala. En éstos últimos ejemplos comentados, las variables incógnitas en las interfaces de acoplamiento son velocidades (o caudales) y fuerzas (presiones y tensiones de corte). En el [Capítulo 5](#) se extiende la técnica de acople a problemas que involucran otros modelos físicos. Se describe el código maestro de acople multifísico desarrollado y se presentan ejemplos de aplicación en el problema neutrónico-termohidráulico.

Capítulo 2

Técnicas de acoplamiento

“”

— alguien, alguna vez

2.1. Paradigma maestro-esclavo

2.2. Códigos maestros utilizados

Dos códigos: Código coupling desarrollado previamente x, para acoplar pares D2N.

Visto que existen códigos cerrados incapaces de ser comunicados por MPI, o que exigen otra formulación de residuos, y durante la tesis se realizó un código más general, Newton, descrito en último capítulo. Con múltiples tipos de conexión (mpi-port, mpi-comm, I/O spawn and system), mappers, etc.

2.3. Formas de comunicación implementadas

mpi vs compartida, ver documentos/biblio-maestria/mpi
técnicas mpi-port, mpi-comm, I/O spawn and system implementación:
grupos, puertos,
spawn, barrier after spawn
system

2.4. Arquitectura de acoplamiento montada en códigos esclavos

Capítulo 3

Modelos fluidodinámicos utilizados

“The City’s central computer told you? R2-D2, you know better than to trust a strange computer. ”

— C-3PO, from Star Wars

3.1. Modelos en Par-GPFEP

Descripción general par-gpfep

Ecuaciones de fluidos, fem, formulación, estabilidad LBB, P1P1 turbulencia, modelos, law wall, estabilidad level set

Agregar sub sección detallando todas las implementaciones hechas en pargpfep, rutinas de integración, etc. Agregar evaluación rutinas en paralelo, (informe ipd).

3.2. Modelos en Relap

descripción general de modelos descripción de las ecuaciones del modelo usado
implementación de la conexión.

3.3. Otros modelos cero-dimensionales

balances de masa y energía cero-dimensionales

Notificar que la implementación de la conexión es similar a pargpfep.

Capítulo 4

Aplicaciones en cálculos fluidodinámicos acoplados

“Rule number one, do everything as possible to have a great life”

— anonymus

4.1. Movimiento por fuerza boyante en un circuito cerrado

4.2. Análisis del segundo sistema de parada del reactor RA-10

agregar resultados del tanque 3d y figuras, nombrar a ludmila

4.3. Resolución de grandes redes hidráulicas

Capítulo 5

Extensión al problema neutrónico-termohidráulico

“We build too many walls and not enough bridges.”

— Isaac Newton, 1643-1727

5.1. Descripción del código Newton

con toda la experiencia ganada se desarrolló el código newton, gral libre, open source, efficietn error handling, etc.

features: formas de conexión mappers, alphas betas gammas y deltas,

5.2. Acople neutrónico-termohidráulico

breve descripción de los códigos utilizados

acople relap fermi

acople fermi cr

acople relap puma

esquema de variables intercambiadas y mapeos

Apéndice A

Formulación de las ecuaciones fluidodinámicas de PAR-GPFEP con el método de elementos finitos

“Negociemos Don Inodoro”

— Fernando de la Rúa, 2001

Apéndice B

Métodos de resolución de sistemas de ecuaciones no lineales

“Negociemos Don Inodoro”

— Fernando de la Rúa, 2001

Bibliografía

- [1] Leiva, J. S., Buscaglia, G. C. Estrategias de acoplamiento entre códigos 0d/1d and códigos cfd 3d. *Mecánica Computacional*, **XXV**, 53–82, 2006. [1](#)
- [2] P.J. Blanco, J. L., Feijóo, R., Buscaglia, G. Black-box decomposition approach for computational hemodynamics: One-dimensional models. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **200**, 1389–1405, 2010. [1](#)
- [3] Leiva, J. S., Blanco, P. J., Buscaglia, G. C. Partitioned analysis for dimensionally-heterogeneous hydraulic networks. *Multiscale Model. Simul.*, **9**, 872–903, 2011. [1](#)
- [4] Quarteroni, A. Introduction to domain decomposition methods. *6th Summer School in Analysis and Applied Mathematics*, 2011. [2](#)
- [5] Caccia, F. A., Dari, E. A. Acoplamiento multiescala en cálculos fluidodinámicos. *Mecánica Computacional*, **XXXIV**, 1955–1972, 2016.
- [6] Jorge S. Leiva, P. J. B., Buscaglia, G. C. Iterative strong coupling of dimensionally heterogeneous models. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **81**, 1558–1580, 2009. [5](#)
- [7] Dennis, J., Shnabel, R. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations. Society for industrial and applied mathematics, 1996. [6](#)
- [8] Broyden, C. A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. *American Mathematical Society*, **19**, 577–593, 1965. [6](#)

Publicaciones asociadas

1. Informes técnicos en Comisión Nacional de Energía Atómica:

- a) Rechiman, L.; Cantero, M.; Dari, E.; Caccia, F.; Chacoma, A. 2015. “Análisis hidrodinámico del Segundo Sistema de Parada del reactor RA10”. Reporte técnico CNEA IN-ATN40MC- Mayo de 2015, Bariloche, Argentina.

2. Publicaciones en revistas internacionales:

- a) Rechiman, L.; Cantero, M. ; Caccia, F.; Chacoma, A. and Dari, E. 2017. “Three-dimensional hydrodynamic modeling of the second shutdown system of an experimental nuclear reactor” (“Modelado hidrodinámico tridimensional del segundo sistema de parada de un reactor nuclear experimental”), Nuclear Engineering and Design, vol. 319, pp 163-175.

3. Presentaciones en congresos con publicación en actas:

- a) Caccia, F. and Dari. E. “Acoplamiento multiescala en cálculos fluidodinámicos”. Mecánica Computacional, vol XXXIV, págs 1955-1972.
- b) Rechiman, L.; Chacoma, A.; Caccia, F.; Dari E. and Cantero, M. "Validation of a multiscale model of the second shutdown system of an experimental nuclear reactor“ (“Validación del modelo multiescala del segundo sistema de parada del reactor nuclear experimental RA-10”). Mecánica Computacional, vol XXXIV, págs 2199-2215.

Agradecimientos

a mi familia, amigos, a sol, ludmila (ra10), guido(fermi), manuely alexis(puma),
fede mezio(relap), compañeros de oficina, mecom, enzo

