

Modelado y Autooptimización de Metaheurísticas e Hiperheurísticas Parametrizadas Paralelas Aplicadas a Problemas de Optimización en Ciencias e Ingeniería

Autor: José Matías Cutillas Lozano

Director: Domingo Giménez Cánovas



Universidad de Murcia, septiembre de 2014

Motivación y objetivos

- Se ha recurrido a **métodos metaheurísticos** para resolver problemas en ciencias e ingeniería que **no** pueden ser abordados mediante **métodos exhaustivos** para encontrar una solución óptima o de buena calidad.
- Se plantea el uso de un **esquema unificado parametrizado de metaheurísticas** para facilitar la experimentación con varios métodos simultáneamente. Se pretende mejorar y **comprobar la utilidad** de dicho esquema.
- Puesto que encontrar una buena metaheurística para un problema dado conlleva un alto coste computacional, se recurre a la **paralelización del esquema**, con dos subobjetivos claros: por un lado reducir el tiempo de ejecución y por otro ayudar a mejorar la efectividad de la propia metaheurística.
- El uso de modelos de tiempo para desarrollar **técnicas de autooptimización** para aplicar de manera más **eficiente** el esquema metaheurístico reduciendo los tiempos de ejecución.
- Puesto que encontrar la mejor metaheurística es un proceso costoso, se pretende desarrollar **hiperheurísticas** con el objetivo de **seleccionar** de manera automática la mejor **metaheurística** para cada problema o conjunto de problemas.

Contenidos

- 1 Métodos de resolución y problemas de optimización
 - Herramientas algorítmicas y computacionales
 - Problemas de optimización
- 2 Ampliación y aplicaciones del esquema metaheurístico
- 3 Hiperheurísticas basadas en esquemas metaheurísticos
 - Hiperheurísticas aplicadas a PCEPA
 - Hiperheurísticas aplicadas a PCOCI
- 4 Metaheurísticas e hiperheurísticas en memoria compartida
 - Autooptimización del esquema paralelo
 - Resultados experimentales
- 5 Metaheurísticas en memoria distribuida
 - Aplicación a sistemas computacionales homogéneos
 - Aplicación a sistemas computacionales heterogéneos
 - Autooptimización del esquema paralelo
- 6 Conclusiones y Trabajos futuros

Contenidos

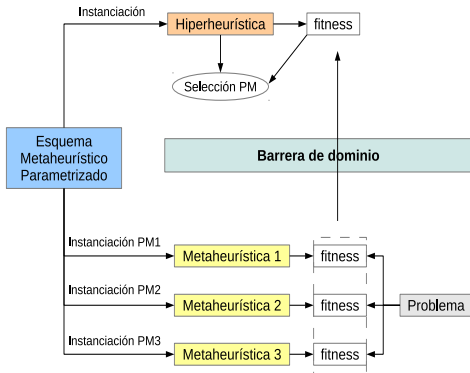
- 1 Métodos de resolución y problemas de optimización
 - Herramientas algorítmicas y computacionales
 - Problemas de optimización
- 2 Ampliación y aplicaciones del esquema metaheurístico
- 3 Hiperheurísticas basadas en esquemas metaheurísticos
- 4 Metaheurísticas e hiperheurísticas en memoria compartida
- 5 Metaheurísticas en memoria distribuida
- 6 Conclusiones y Trabajos futuros

Metaheurísticas

Descripción

- **Estrategias generales** para la **búsqueda de soluciones** (casi) óptimas dentro del espacio de soluciones.
- Metaheurísticas **basadas en población** (capacidad de exploración) y **basadas en trayectoria** (capacidad de explotación). Hibridación para aprovechar ambas fortalezas.
- Cuatro **metaheurísticas puras**: Búsqueda Voraz Adaptativa y Aleatoria (**GR**), Algoritmo Genético (**GA**), Búsqueda Dispersa (**SS**), Búsqueda Tabú (**TS**).
- Once **combinaciones**: GR+GA, GR+SS, GR+TS, GA+SS, GA+TS, SS+TS, GR+GA+SS, GR+GA+TS, GR+SS+TS, GA+SS+TS, GR+GA+SS+TS.
- Total: 15 metaheurísticas o combinaciones de metaheurísticas.

Hiperheurísticas



Descripción

- Misma estructura e implementación similar a la de las metaheurísticas pero con **mayor abstracción**: se trabaja **sobre el espacio de metaheurísticas**.
- **Selección automática** de parámetros metaheurísticos.
- Separación de dominios: sólo flujo de información sobre fitness o coste.
- **Evitan la dependencia del problema**, encontrando la mejor solución para un conjunto de instancias.

El Esquema Parametrizado de Metaheurísticas

El Esquema

```
Inicializar( $S$ ,  $ParamIni$ )  
mientras (no CondiciónDeFin( $S$ ,  $ParamFin$ ))  
     $SS$  = Seleccionar( $S$ ,  $ParamSel$ )  
     $SS1$  = Combinar( $SS$ ,  $ParamCom$ )  
     $SS2$  = Mejorar( $SS1$ ,  $ParamMej$ )  
     $S$  = Incluir( $SS2$ ,  $ParamInc$ )
```

Descripción

- **Fácil selección** de diferentes **metaheurísticas** o combinaciones cambiando los parámetros $ParamX$.
- **Adaptación sencilla** de metaheurísticas a problemas específicos.
- Mismo esquema **aplicable a hiperheurísticas**.

Posteriormente veremos que se puede...

Paralelizar el esquema introduciendo parámetros de paralelismo para:

- Fijar el número de hilos de ejecución ($HilosIni$, $HilosCom$, $HilosMej$, $HilosInc$) para cada rutina en memoria compartida.
- Y el número de procesos total, el volumen de intercambio de información entre ellos y su frecuencia (p , $NEMPar$, $NGMPar$) en paso de mensajes.

El Esquema Parametrizado de Metaheurísticas

El Esquema

```
Inicializar( $S, ParamIni$ )  
mientras (no CondiciónDeFin( $S, ParamFin$ ))  
     $SS =$  Seleccionar( $S, ParamSel$ )  
     $SS1 =$  Combinar( $SS, ParamCom$ )  
     $SS2 =$  Mejorar( $SS1, ParamMej$ )  
     $S =$  Incluir( $SS2, ParamInc$ )
```

Descripción

- Fácil selección de diferentes metaheurísticas o combinaciones cambiando los parámetros $ParamX$.
- Adaptación sencilla de metaheurísticas a problemas específicos.
- Mismo esquema aplicable a hiperheurísticas.

Posteriormente veremos que se puede...

Paralelizar el esquema introduciendo parámetros de paralelismo para:

- Fijar el número de hilos de ejecución ($HilosIni$, $HilosCom$, $HilosMej$, $HilosInc$) para cada rutina en memoria compartida.
- Y el número de procesos total, el volumen de intercambio de información entre ellos y su frecuencia (p , $NEMPar$, $NGMPar$) en paso de mensajes.

Esquema meta e hiperheurístico

Características

	Metaheurísticas	Hiperheurísticas
Problema de optimización	Problema dado de ciencias o ingeniería.	Selección de la metaheurística óptima para cada problema o conjunto de ellos.

Esquema meta e hiperheurístico

Características

	Metaheurísticas	Hiperheurísticas
Problema de optimización	Problema dado de ciencias o ingeniería.	Selección de la metaheurística óptima para cada problema o conjunto de ellos.
Individuo	Vector de enteros o reales con valores de variables específicos para cada problema de optimización.	Vector de enteros <i>MetaheurParam</i> de tamaño 20 que recoge los parámetros de cada metaheurística.

Esquema meta e hiperheurístico

Características

	Metaheurísticas	Hiperheurísticas
Problema de optimización	Problema dado de ciencias o ingeniería.	Selección de la metaheurística óptima para cada problema o conjunto de ellos.
Individuo	Vector de enteros o reales con valores de variables específicos para cada problema de optimización.	Vector de enteros <i>MetaheurParam</i> de tamaño 20 que recoge los parámetros de cada metaheurística.
Conjunto de Referencia	Conjunto de elementos de cada problema.	Conjunto de metaheurísticas o combinaciones aplicables.

Esquema meta e hiperheurístico

Características

	Metaheurísticas	Hiperheurísticas
Problema de optimización	Problema dado de ciencias o ingeniería.	Selección de la metaheurística óptima para cada problema o conjunto de ellos.
Individuo	Vector de enteros o reales con valores de variables específicos para cada problema de optimización.	Vector de enteros <i>MetaheurParam</i> de tamaño 20 que recoge los parámetros de cada metaheurística.
Conjunto de Referencia	Conjunto de elementos de cada problema.	Conjunto de metaheurísticas o combinaciones aplicables.
Fitness	Función objetivo específica del problema.	Función objetivo específica del problema.

Esquema meta e hiperheurístico

Características

	Metaheurísticas	Hiperheurísticas
Problema de optimización	Problema dado de ciencias o ingeniería.	Selección de la metaheurística óptima para cada problema o conjunto de ellos.
Individuo	Vector de enteros o reales con valores de variables específicos para cada problema de optimización.	Vector de enteros <i>MetaheurParam</i> de tamaño 20 que recoge los parámetros de cada metaheurística.
Conjunto de Referencia	Conjunto de elementos de cada problema.	Conjunto de metaheurísticas o combinaciones aplicables.
Fitness	Función objetivo específica del problema.	Función objetivo específica del problema.
Objetivo	Obtención del mejor individuo (conjunto de variables del problema científico dado).	Obtención de la combinación óptima de parámetros metaheurísticos.

Esquema meta e hiperheurístico

Características

	Metaheurísticas	Hiperheurísticas
Problema de optimización	Problema dado de ciencias o ingeniería.	Selección de la metaheurística óptima para cada problema o conjunto de ellos.
Individuo	Vector de enteros o reales con valores de variables específicos para cada problema de optimización.	Vector de enteros <i>MetaheurParam</i> de tamaño 20 que recoge los parámetros de cada metaheurística.
Conjunto de Referencia	Conjunto de elementos de cada problema.	Conjunto de metaheurísticas o combinaciones aplicables.
Fitness	Función objetivo específica del problema.	Función objetivo específica del problema.
Objetivo	Obtención del mejor individuo (conjunto de variables del problema científico dado).	Obtención de la combinación óptima de parámetros metaheurísticos.
Coste Computacional Relativo	Bajo-Medio.	Alto.

Esquema meta e hiperheurístico

Características

	Metaheurísticas	Hiperheurísticas
Problema de optimización	Problema dado de ciencias o ingeniería.	Selección de la metaheurística óptima para cada problema o conjunto de ellos.
Individuo	Vector de enteros o reales con valores de variables específicos para cada problema de optimización.	Vector de enteros <i>MetaheurParam</i> de tamaño 20 que recoge los parámetros de cada metaheurística.
Conjunto de Referencia	Conjunto de elementos de cada problema.	Conjunto de metaheurísticas o combinaciones aplicables.
Fitness	Función objetivo específica del problema.	Función objetivo específica del problema.
Objetivo	Obtención del mejor individuo (conjunto de variables del problema científico dado).	Obtención de la combinación óptima de parámetros metaheurísticos.
Coste Computacional Relativo	Bajo-Medio.	Alto.
Modelado y autooptimización	Técnica de selección automática de parámetros de paralelismo.	Misma técnica que para metaheurísticas.

Esquema meta e hiperheurístico

Características

	Metaheurísticas	Hiperheurísticas
Problema de optimización	Problema dado de ciencias o ingeniería.	Selección de la metaheurística óptima para cada problema o conjunto de ellos.
Individuo	Vector de enteros o reales con valores de variables específicos para cada problema de optimización.	Vector de enteros <i>MetaheurParam</i> de tamaño 20 que recoge los parámetros de cada metaheurística.
Conjunto de Referencia	Conjunto de elementos de cada problema.	Conjunto de metaheurísticas o combinaciones aplicables.
Fitness	Función objetivo específica del problema.	Función objetivo específica del problema.
Objetivo	Obtención del mejor individuo (conjunto de variables del problema científico dado).	Obtención de la combinación óptima de parámetros metaheurísticos.
Coste Computacional Relativo	Bajo-Medio.	Alto.
Modelado y autooptimización	Técnica de selección automática de parámetros de paralelismo.	Misma técnica que para metaheurísticas.

Modelado y autooptimización del esquema

Descripción

- Objetivo: reducir al máximo el tiempo de ejecución de las metaheurísticas e hiperheurísticas mediante la **optimización** de los **parámetros de paralelismo**.
- Cuando ejecutamos hiperheurísticas sobre metaheurísticas la técnica se aplica preferiblemente a alto nivel.
- Tres **fases**:
 - Creación de un modelo de tiempos de cada rutina en memoria compartida, y modelo global para paso de mensajes en una primera fase de **Diseño**.
 - Determinación de las constantes para cada sistema y problema en una segunda fase de **Instalación**.
 - Selección en tiempo de ejecución de los parámetros de paralelismo óptimos como función de los parámetros metaheurísticos: número de hilos en memoria compartida y número de procesos en paso de mensajes. Es la tercera fase: **Ejecución**.

Sistemas computacionales

Descripción

- Supercomputador *Ben Arabí* del Murcia Supercomputing Center. Se usó el nodo central **Ben**, un *HP Integrity Superdome SX2000* con 128 cores de *Intel Itanium-2 dual-core Montvale* con memoria compartida.
- Red del Grupo de Investigación en Computación Científica y Programación Paralela de la Universidad de Murcia. Formada por cinco nodos conectados mediante una red de 100 Mb/s:
 - **Saturno** es un sistema NUMA con 4 nodos Intel hexa-core NEHALEM-EX EC E7530, y un total de 24 cores, 1.87 GHz, 32 GB de memoria compartida.
 - **Marte** y **Mercurio** son AMD Phenom II X6 1075T (hexa-core), 3 GHz, 15 GB (Marte) and 8 GB (Mercurio), private L1 and L2 caches of 64 KB and 512 KB, y L3 de 6 MB compartidos por todos los cores.
 - **Júpiter** con dos hexa-cores (12 cores) Intel Xeon E5-2620 a 2.00GHz y 32 GB de RAM.
 - **Luna** con un procesador quad-core Intel Core 2 Quad Q6600a 2.4 GHz con 4 GB de memoria.

Problema de consumo de electricidad en pozos de agua (PCEPA)

- Conjunto de pozos de agua con bombas (B) de potencia conocida, que extraen flujos de agua durante un intervalo de tiempo diario R . El caudal total es la suma de los caudales aportados por cada pozo.
- Las bombas están en funcionamiento o fuera de servicio en cada intervalo de tiempo considerado. Las bombas operan eléctricamente y la electricidad tiene un coste diario que debería ser minimizado. La función objetivo es:

$$\text{Minimizar } C_e = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^B T_i P_j N_i x_{ij} \quad (1)$$

- C_e : coste de la electricidad consumida por la combinación de bombas seleccionadas en un día
- T_i : coste de la electricidad en un rango i
- P_j : potencia eléctrica consumida por la bomba j
- N_i : número de horas de bombeo en el intervalo de tiempo i
- x_{ij} : elemento binario de una matriz: 1 o 0 para bomba encendida o apagada
- Un **individuo** o elemento se representa por la **matriz binaria** x , de **tamaño** $B \cdot R$, que codifica el conjunto de **bombas** distribuidas en diferentes **rangos horarios**.

Problema de determinación de constantes cinéticas (PCOCI)

- La búsqueda de los parámetros cinéticos de una **reacción química** que ocurre en fase heterogénea implica la simulación de los procesos que ocurren en el estómago humano.
- Dependiendo del pH, existen **tres vías** principales por las que se produce la disolución del carbonato de calcio:

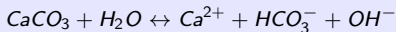
- Por reacción con ácido acético.



- Por reacción con ácido carbónico.



- Y por reacción de hidrólisis.



- Cuando la reacción se produce por varias vías independientes, la **velocidad global** es simplemente la suma de todas las velocidades individuales.

Problema de determinación de constantes cinéticas (PCOCI)

- Así, la **cinética de disolución del carbonato de calcio** es una función de la concentración de ácido carbónico en la disolución, el pH y el área de transferencia de masa:

$$\frac{1}{V} \frac{dN_{Ca^{2+}}}{dt} = -k_1 a^{n_1} [H_3O^+]^{n_2} - k_2 a^{n_3} [H_2CO_3]^{n_4} - k_3$$

- k_1 , k_2 y k_3 son las constantes combinadas de velocidad de reacción.
 - n_1 , n_2 , n_3 y n_4 son los órdenes de reacción.
 - a es el área de la pastilla.
- Un **individuo** se representa por un **vector real de tamaño siete** que representa el conjunto de **constantes cinéticas**.
 - Los rangos de valores para las constantes se establecen siguiendo criterios empíricos.
 - Cada vez que se calcula el fitness de un individuo, se resuelve el sistema químico completo:

para $i = 0 \rightarrow N$ **hacer**

Calcular en el instante i : $[Ca^{2+}]$, a , $[H_3O^+]$, $[HCO^-]$, $[H_2CO_3]$, pH_{cal} , $\Delta [Ca^{2+}]$,
 $[CH_3COOH]$, $[CH_3COO^-]$

$Fitness = Fitness + (pH_{exp,i} - pH_{cal,i})^2$

fin para

Contenidos

- 1 Métodos de resolución y problemas de optimización
- 2 Ampliación y aplicaciones del esquema metaheurístico**
- 3 Hiperheurísticas basadas en esquemas metaheurísticos
- 4 Metaheurísticas e hiperheurísticas en memoria compartida
- 5 Metaheurísticas en memoria distribuida
- 6 Conclusiones y Trabajos futuros

Ampliación del esquema metaheurístico

Inclusión de la Búsqueda Tabú en el esquema

- Tres metaheurísticas inicialmente: GA, SS y GR. Se **amplía** el esquema con **TS**: aumenta el número de combinaciones posibles.
- Modificaciones sólo en las funciones de mejora y diversificación.
- Se consideran **memorias a corto y largo plazo** para evitar movimientos repetitivos en las mejoras y la inclusión de individuos frecuentemente explorados.
- Cuatro **nuevos parámetros**: *MCPI_{ni}*, *MCMMej*, *MCDMej*, *MLP_{inc}*.
- El esquema pasa de 16 a 20 parámetros.

Aplicación del esquema a PCEPA

Parámetros de metaheurísticas y combinaciones

		GR	TS	SS	GA	GR+TS	GR+SS	GR+GA	TS+SS	TS+GA
Ini	NEIIni	200	200	100	100	200	200	200	100	100
	NEFIni	1	1	20	100	1	20	100	20	100
	PEMIni	100	100	100	0	100	100	100	100	0
	IMEIni	50	10	50	0	50	50	50	50	0
	MCPIni	0	10	0	0	10	0	0	10	0
Sel	NEMSel	0	1	10	100	0	10	100	10	100
	NEPSel	0	0	10	0	0	25	0	10	0
Com	NMMCom	0	0	90	50	0	90	50	90	50
	NMPCom	0	0	100	0	0	100	0	100	0
	NPPCom	0	0	90	0	0	90	0	90	0
Mej	PEMMej	0	100	100	0	0	100	0	100	0
	IMEMej	0	5	5	0	0	5	0	5	0
	MCMMej	0	10	0	0	0	0	0	10	0
	PEDMej	0	0	0	10	0	0	10	0	10
	IDEMej	0	0	0	5	0	0	5	0	5
	MCDMej	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Inc	NEMInc	0	1	10	100	0	10	100	10	100
	MLPInc	0	30	0	0	0	0	0	30	30

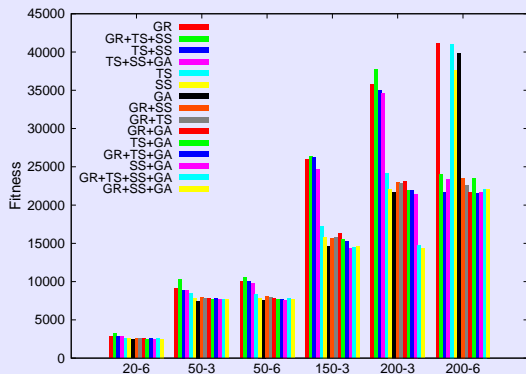
Aplicación del esquema a PCEPA

Parámetros de metaheurísticas y combinaciones

	SS+GA	GR+TS+SS	GR+TS+GA	GR+SS+GA	TS+SS+GA	GR+TS+SS+GA
NEIIni	100	200	200	200	100	200
NEFIni	50	20	100	50	50	50
PEMIni	100	100	100	100	100	100
IMEIni	50	50	50	50	50	50
MCPIni	0	10	10	0	10	10
NEMSel	25	10	100	25	25	25
NEPSel	25	25	0	25	25	25
NMMCom	90	90	50	90	90	90
NMPCom	100	100	0	100	100	100
NPPCom	90	90	0	90	90	90
PEMMej	100	100	0	100	100	100
IMEMej	5	5	0	5	5	5
MCMMej	0	10	0	0	10	10
PEDMej	10	0	10	10	10	10
IDEMej	5	0	5	5	5	5
MCDMej	0	0	10	0	10	10
NEMInc	25	10	100	25	25	25
MLPInc	0	30	30	0	30	30

Resultados experimentales PCEPA

Fitness alcanzado para diferentes combinaciones de metaheurísticas y tamaños del problema PCEPA

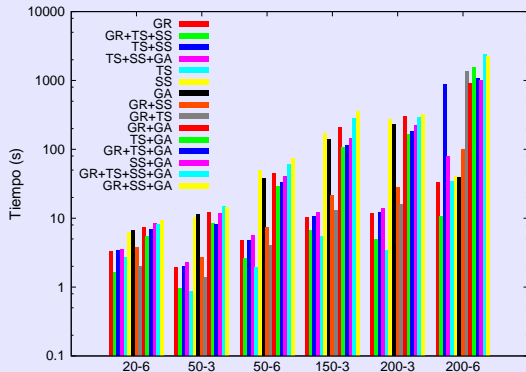


Análisis resultados

- Mejores fitness (más bajos): GA y combinaciones que incluyen SS+GA.
- Pobres resultados con GR que mejoran al hibridarse con otras.
- TS arroja resultados intermedios, su hibridación con SS no da buenos resultados.
- La hibridación cuaternaria de metaheurísticas es satisfactoria aunque no la mejor.

Resultados experimentales PCEPA

Tiempos de ejecución

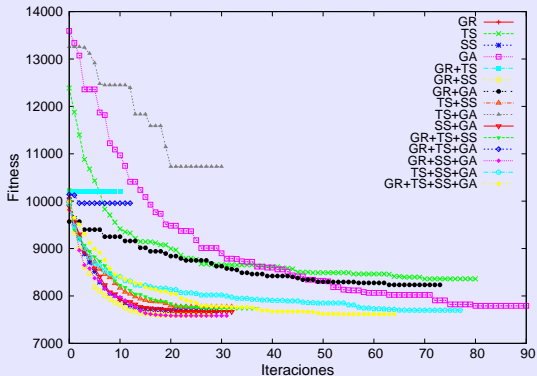


Análisis resultados

Mejores resultados de tiempo de ejecución: TS, GR+TS y GR+TS+SS.

Resultados experimentales PCEPA

Evolución del fitness en iteraciones sucesivas para PCEPA 50-6



Análisis resultados

- SS alcanza muy buenos resultados en muy pocas iteraciones.
- Combinaciones incluyendo SS+GA: idóneas para PCEPA 50-6 desde el punto de vista del fitness.

Aplicación del esquema a PCOCI

Parámetros de metaheurísticas y combinaciones

		GR	TS	SS	GA	GR+TS	GR+SS	GR+GA	TS+SS	TS+GA
Ini	NEIIni	50	50	20	20	50	50	50	20	20
	NEFIni	1	1	10	20	1	10	20	10	20
	PEMIni	100	100	100	0	100	100	100	100	0
	IMEIni	15	15	15	0	15	15	15	15	0
	MCPIni	0	2	0	0	2	0	0	2	0
Sel	NEMSel	0	1	5	20	0	5	20	5	20
	NEPSel	0	0	5	0	0	5	0	5	0
Com	NMMCom	0	0	15	10	0	15	10	15	10
	NMPCom	0	0	20	0	0	20	0	20	0
	NPPCom	0	0	15	0	0	15	0	15	0
Mej	PEMMej	0	100	100	0	0	100	0	100	0
	IMEMej	0	5	5	0	0	5	0	5	0
	MCMMej	0	2	0	0	0	0	0	2	0
	PEDMej	0	0	0	20	0	0	20	0	20
	IDEMej	0	0	0	5	0	0	5	0	2
	MCDMej	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Inc	NEMInc	0	1	5	20	0	5	20	5	20
	MLPInc	0	3	0	0	0	0	0	3	3

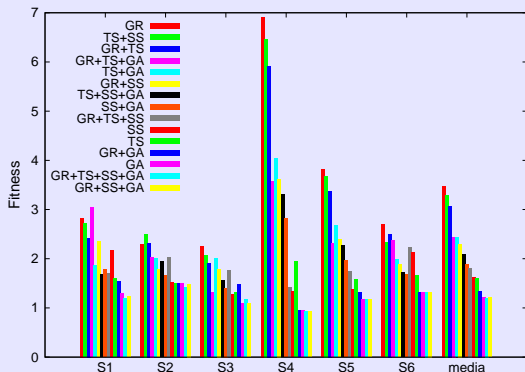
Aplicación del esquema a PCOCI

Parámetros de metaheurísticas y combinaciones

	SS+GA	GR+TS+SS	GR+TS+GA	GR+SS+GA	TS+SS+GA	GR+TS+SS+GA
NEIIni	20	50	50	50	20	50
NEFIni	15	10	20	15	15	15
PEMIni	100	100	100	100	100	100
IMEIni	15	15	15	15	15	15
MCPIni	0	2	2	0	2	2
NEMSel	8	5	20	8	8	8
NEPSel	7	5	0	7	7	7
NMMCom	15	15	10	15	15	15
NMPCom	20	20	0	20	20	20
NPPCom	15	15	0	15	15	15
PEMMej	100	100	0	100	100	100
IMEMej	5	5	0	5	5	5
MCMMej	0	2	0	0	2	2
PEDMej	20	0	20	20	20	20
IDEMej	5	0	5	5	5	5
MCDMej	0	0	2	0	2	2
NEMInc	8	5	20	8	8	8
MLPInc	0	3	3	0	3	3

Resultados experimentales PCOCI

Fitness alcanzado para diferentes combinaciones de metaheurísticas y tamaños del problema PCOCI

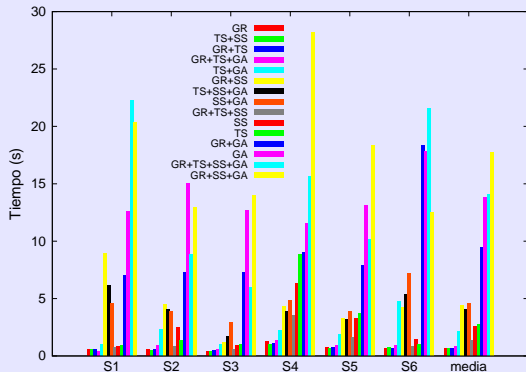


Análisis resultados

- Los mejores resultados para PCOCI se obtienen con la metaheurística GA y sus combinaciones.
- TS, SS y las hibridaciones de SS producen resultados intermedios generalmente.
- Con GR los resultados son peores en muchos casos, pero su hibridación con otras metaheurísticas produce resultados satisfactorios.
- Las hibridaciones de TS también producen resultados de baja calidad.

Resultados experimentales PCOCI

Tiempos de ejecución

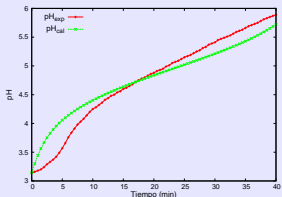


Análisis resultados

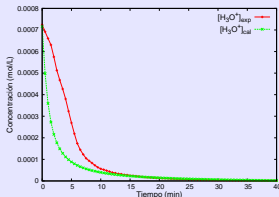
GR, TS+SS, GR+TS, GR+TS+GA y GR+TS+SS producen los mejores resultados en cuanto a tiempo de ejecución.

Resultados experimentales PCOCI

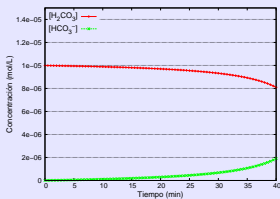
Evolución con el tiempo de las distintas especies químicas presentes en el medio de reacción. Valores experimentales y calculados



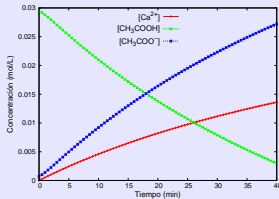
pH



Protones



Especies carbonatadas



Especies acéticas y calcio

Contenidos

- 1 Métodos de resolución y problemas de optimización
- 2 Ampliación y aplicaciones del esquema metaheurístico
- 3 Hiperheurísticas basadas en esquemas metaheurísticos**
 - Hiperheurísticas aplicadas a PCEPA
 - Hiperheurísticas aplicadas a PCOCI
- 4 Metaheurísticas e hiperheurísticas en memoria compartida
- 5 Metaheurísticas en memoria distribuida
- 6 Conclusiones y Trabajos futuros

Características generales hiperheurísticas

Funciones básicas del esquema

	Metaheurísticas	Hiperheurísticas
Inicializar	Tamaño población, porcentajes de mejora e intensificación relativamente altos	Poblaciones más reducidas, porcentajes de mejora más bajos e intensificaciones menos agresivas
CondiciónDeFin	Número de iteraciones alto	Menos iteraciones hasta fin
Seleccionar	Por conjuntos de mejores y peores elementos	Similar a las metaheurísticas
Combinar	Se combinan pares de elementos mejores, peores y mejores-peores	Varias posibilidades. Se ha elegido combinación por grupos de parámetros (ComGru): $GrupoIni = \{NEIni, NEFin\}$, $GrupoMejIni = \{PEMIni, IMEIni\}$, etc.
Mejorar	Porcentajes de mejora pueden ser altos (no en la diversificación), así como las intensificaciones	Valores más bajos de los parámetros para reducir el tiempo de ejecución
Incluir	Memorias a largo plazo tabú relativamente altas	Memorias tabú más reducidas puesto que se necesitan menos iteraciones

Configuraciones hiperheurísticas

Cálculo del fitness

	Fit1P1E	FitVPVE2	FitVP1E
Instancias de problema	1	Varias	Varias
Dependencia del problema	Sí	No	No
Ejecuciones	1	Varias	1
Coste computacional relativo	Bajo	Alto	Bajo-Medio
Obtención de metaheurísticas	Directa	Media	Directa
Posibles incompatibilidades	No	parámetros En la media de parámetros	No

Límites de los parámetros metaheurísticos a seleccionar por las hiperheurísticas

	NEIIni	NEFINi	PEMIni	IMEIni	MCPIIni	NEMSel
Inferior	5	5	0	1	0	2
Superior	200	100	100	20	15	100

	NEPSel	NMMCom	NMPCom	NPPCom	PEMMej	IMEMej
Inferior	2	5	5	5	0	1
Superior	100	100	100	100	100	20

	MCMMej	PEDMej	IDEMej	MCDMej	NEMInc	MLPInc
Inferior	0	0	1	0	2	0
Superior	15	100	10	15	100	15

Configuraciones hiperheurísticas

Parámetros hiperheurísticos

	NEIIni	NEFIIni	PEMIIni	IMEIIni	MCPIIni	NEMSel
Hhi	20	20	50	5	5	10
Hre	5	5	50	3	2	3
Hge	20	20	0	0	0	20

	NEPSel	NMMCom	NMPCom	NPPCom	PEMMej	IMEMej
Hhi	10	15	20	15	50	5
Hre	2	2	3	2	50	3
Hge	0	10	0	0	0	0

	MCMMej	PEDMej	IDEMej	MCDMej	NEMInc	MLPInc
Hhi	5	10	5	5	10	5
Hre	2	10	5	2	3	5
Hge	0	10	5	0	20	0

- **Hhi**: hiperheurística híbrida de tamaño medio, con poblaciones y mejoras moderadas y no muy intensas, y con un número de elementos a combinar moderado.
- **Hre**: hiperheurística híbrida reducida. Tiene los mismos parámetros que Hhi pero con valores más bajos para muchos de ellos con el fin de reducir el tiempo de ejecución.
- **Hge**: hiperheurística con un enfoque de algoritmo genético, población pequeña y mejora solo en la diversificación. Los valores de los parámetros Tabú se establecen en cero.

Metaheurísticas

Parámetros metaheurísticos utilizados en los experimentos: metaheurísticas puras e híbridas no seleccionadas automáticamente

	NEIIni	NEFIni	PEMIni	IMEIni	MCPIIni	NEMSel
GR	200	1	100	50	0	0
GA	100	100	0	0	0	100
SS	100	20	100	50	0	10
TS	200	1	100	10	5	1
Mhi1	200	50	100	50	10	25
Mhi2	50	15	100	15	2	8

	NEPSel	NMMCom	NMPCom	NPPCom	PEMMej	IMEMej
GR	0	0	0	0	0	0
GA	0	50	0	0	0	0
SS	10	90	100	90	100	5
TS	0	0	0	0	100	5
Mhi1	25	90	100	90	100	5
Mhi2	7	15	20	15	100	5

	MCMMej	PEDMej	IDEMej	MCDMej	NEMInc	MLPInc
GR	0	0	0	0	0	0
GA	0	10	5	0	100	0
SS	0	0	0	0	10	0
TS	5	0	0	0	1	20
Mhi1	10	10	5	10	25	30
Mhi2	2	20	5	2	8	3

Parámetros metaheurísticos obtenidos al aplicar hiperheurísticas a PCEPA

Aplicación de Hhi, Hre y Hge a instancias de PCEPA 10-3

	NEIIni	NEFIIni	PEMIIni	IMEIIni	MCPIIni	NEMSel
HhiFit1P1E	8	8	50	16	14	8
HhiFitVPVE2	39	37	54	12	9	33
HreFit1P1E	111	60	6	16	8	2
HreFitVPVE2	106	39	26	11	10	19
HgeFit1P1E	122	43	44	13	7	43
HgeFitVPVE2	82	49	57	6	9	26

	NEPSel	NMMCom	NMPCom	NPPCom	PEMMej	IMEMej
HhiFit1P1E	0	37	0	0	16	7
HhiFitVPVE2	4	33	22	5	27	12
HreFit1P1E	58	30	69	94	94	10
HreFitVPVE2	19	44	23	31	72	13
HgeFit1P1E	0	99	0	0	40	11
HgeFitVPVE2	23	94	21	29	36	10

	MCMMej	PEDMej	IDEMej	MCDMej	NEMInc	MLPInc
HhiFit1P1E	4	60	4	9	8	9
HhiFitVPVE2	5	50	6	9	19	12
HreFit1P1E	13	49	2	8	15	2
HreFitVPVE2	7	71	4	7	22	2
HgeFit1P1E	1	97	9	8	43	5
HgeFitVPVE2	8	89	7	5	49	6

Discusión parámetros

- Valores intermedios del parámetro *NEIIni*.
- Porcentaje de mejora moderado en muchos casos, con una intensidad de la mejora con valores medios o altos en el rango considerado.
- Se ha dado prioridad a la combinación de los mejores elementos.
- La diversificación ha resultado importante para este problema, y el número de mejores elementos a incluir en el conjunto de referencia es alto.

Aplicación hiperheurísticas a PCEPA

Aplicación directa hiperheurísticas a PCEPA 10-3 (Fit1P1E)

	Hhi	Hre	Hge
fitness (€)	2047.81	2047.81	2047.81
tiempo (s)	49705	5212	1517
IC	9.82	93.69	321.9

Aplicación de las mejores metaheurísticas obtenidas con tres configuraciones hiperheurísticas a PCEPA 20-6, 40-3 y 40-6 (valores medios)

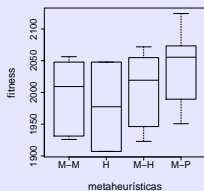
		Hhi	Hre	Hge	Media
Fit1P1E	(f)	4065.60	4190.89	4322.45	4192.98
	(t)	2.80	25.76	22.91	17.16
	(IC)	8.78	0.93	1.01	3.57
FitVPVE2	(f)	4117.35	4174.70	4161.14	4151.06
	(t)	11.26	22.23	20.42	17.97
	(IC)	2.16	1.08	1.18	1.47
FitVP1E	(f)	4062.84	4118.14	3966.74	4049.24
	(t)	23.25	41.53	18.06	27.61
	(IC)	1.06	0.58	1.40	1.01
Media	(f)	4081.93	4161.24	4150.11	
	(t)	12.44	29.84	20.46	
	(IC)	4.00	0.86	1.19	

Discusión resultados

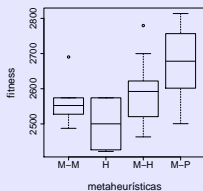
- Hre y Hge mucho más rápidas que Hhi y fitness iguales en la aplicación directa de hiperheurísticas.
- Las metaheurísticas obtenidas con Hhi mejoran, de media, a Hre y Hge en fitness e IC.
- El fitness obtenido con FitVP1E mejora los obtenidos con Fit1P1E y FitVPVE2.
- El mejor IC viene de Fit1P1E (metaheurística menos efectiva con tiempo de ejecución más reducido).

Aplicación hiperheurísticas a PCEPA. Resumen estadístico

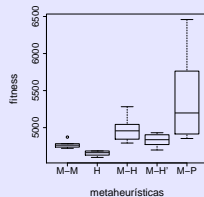
Resumen estadístico del fitness



PCEPA 10-x



PCEPA 20-x



PCEPA 40-x

Conjuntos de algoritmos

- M-M: mejores metaheurísticas no seleccionadas automáticamente.
- H: aplicación directa de Hhi, Hre y Hge.
- M-H y M-H': conjunto de metaheurísticas obtenidas a partir de las hiperheurísticas, con computación del fitness agrupado en Fit1P1E y FitVPVE2 (M-H) y FitVP1E (M-H').
- M-P: conjunto de las cuatro metaheurísticas puras.

Aplicación hiperheurísticas a PCEPA. Resumen estadístico

Test de Wilcoxon para dos muestras con un nivel de significación $\alpha = 0.05$

instancia	Fit (M-H)	M-M	H	M-H	M-P
20-x	1P1E & VPVE2	2564.06~	2499.54+	2580.62-	2673.44-
40-x	1P1E & VPVE2	4773.33-	4653.52+	4965.53-	5382.86-
40-x	VP1E	4773.33-	4653.52+	4829.93-	5382.86-

Test de Wilcoxon

instancia	Fit (M-H)	M-M	M-P
20-x	1P1E & VPVE2	~	-
40-x	1P1E & VPVE2	+	~
40-x	VP1E (M-H')	~	-

Análisis resultados

- El mejor algoritmo en todos los casos fue la hiperheurística (H) aplicada directamente a cada instancia.
- FitVP1E mejora a Fit1P1E y FitVPVE2.
- Tomando M-H (o M-H' para FitVP1E) como grupo de control: el grupo M-H es mejor o igual que M-P, igualando a M-M en dos de tres casos.

Aplicación hiperheurísticas a PCOCI

Parámetros metaheurísticos obtenidos al aplicar Hre y Hge a tres instancias de PCOCI de validación (S1, S2, S3), variando la instancia en cada iteración (FitVP1E)

	NEIIni	NEFIIni	PEMIIni	IMEIIni	MCPIIni	NEMSel
Hre _{FitVP1E}	24	17	45	2	12	6
Hge _{FitVP1E}	145	32	66	11	8	5

	NEPSel	NMMCom	NMPCom	NPPCom	PEMMej	IMEMej
Hre _{FitVP1E}	9	99	1	8	86	10
Hge _{FitVP1E}	21	71	77	62	72	14

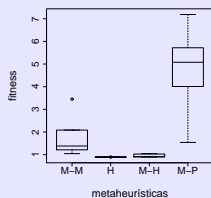
	MCMMej	PEDMej	IDEMej	MCDMej	NEMInc	MLPInc
Hre _{FitVP1E}	11	86	4	9	16	9
Hge _{FitVP1E}	8	74	8	12	27	3

Configuraciones elegidas y parámetros obtenidos

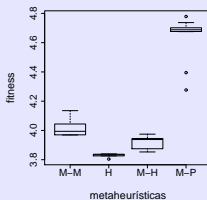
- Se ha descartado Hhi por su excesivo coste computacional.
- Único método de cálculo del fitness: FitVP1E (especialmente eficaz).
- Diferencia importante en *NEIIni*; *NEFIIni* similar y pequeño.
- *NMPCom* y *NPPCom* mayores con *Hge_{FitVP1E}* que con *Hre_{FitVP1E}*.
- La mejora (*PEMMej*, *IMEMej*) y la diversificación (*PEDMej*, *IDEMej*) son importantes.
- Prioridad en la selección de los mejores elementos del conjunto de referencia (*NEMInc*).

Aplicación hiperheurísticas a PCOCI. Resumen estadístico

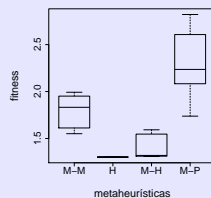
Resumen estadístico del fitness



PCOCI S4



PCOCI S5



PCOCI S6

Test de Wilcoxon

instancia	M-M	H	M-H	M-P
S4	1.7600-	0.8932+	0.9485-	4.7576-
S5	4.0178-	3.8291+	3.9206-	4.6414-
S6	1.7953-	1.3023+	1.3997-	2.2873-

Discusión resultados

- El mejor algoritmo en todos los casos fue la hiperheurística (H) aplicada directamente a cada instancia.
- El grupo (M-H) supera estadísticamente en calidad a (M-M) en todos los casos.

Contenidos

- 1 Métodos de resolución y problemas de optimización
- 2 Ampliación y aplicaciones del esquema metaheurístico
- 3 Hiperheurísticas basadas en esquemas metaheurísticos
- 4 Metaheurísticas e hiperheurísticas en memoria compartida**
 - Autooptimización del esquema paralelo
 - Resultados experimentales
- 5 Metaheurísticas en memoria distribuida
- 6 Conclusiones y Trabajos futuros

Paralelización del esquema en memoria compartida

El Esquema

Inicializar(S , $ParamIni$, $HilosIni$)
mientras (no CondiciónDeFin(S , $ParamFin$, $HilosFin$))
 SS = Seleccionar(S , $ParamSel$, $HilosSel$)
 $SS1$ = Combinar(SS , $ParamCom$, $HilosCom$)
 $SS2$ = Mejorar($SS1$, $ParamMej$, $HilosMej$)
 S = Incluir($SS2$, $ParamInc$, $HilosInc$)

Descripción

- Paralelización independiente de las funciones con **parámetros de paralelismo** (número de hilos) para cada función.
- El valor óptimo de los **parámetros de paralelismo** depende de los valores de los **parámetros metaheurísticos**.

Modelo de tiempos en memoria compartida. Funciones de un nivel de paralelismo

$$t_{1-nivel} = \frac{k_{s1} \cdot NE}{p} + k_p \cdot p$$

$$p_{opt.} = \sqrt{\frac{k_{s1} \cdot NE}{k_p}}$$

Constantes del sistema y parámetros metaheurísticos en el modelo

$F_{1-nivel}$	k_{s1}	NE
Gen-Ini	k_g	$NEIni$
Combinar	k_c	$2 \cdot (NMMCom + NMPCom + NPPCom)$
Incluir	k_i	$NEFin + 2 \cdot (NMMCom + NMPCom + NPPCom) - NEMInc$

Modelo de tiempos en memoria compartida

Funciones de dos niveles de paralelismo

$$t_{2-niveles} = \frac{k_{s2} \cdot Param}{p_1 \cdot p_2} + k_{p,1} \cdot p_1 + k_{p,2} \cdot p_2$$

$$p_{1,opt.} = \sqrt[3]{\frac{k_{s2} \cdot k_{p,2}}{k_{p,1}^2} \cdot Param}$$

$$p_{2,opt.} = \sqrt[3]{\frac{k_{s2} \cdot k_{p,1}}{k_{p,2}^2} \cdot Param}$$

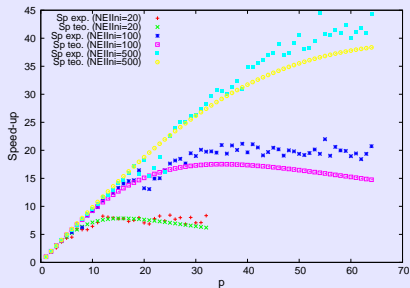
$$\text{con } Param = \frac{NE \cdot PM \cdot IM}{100}$$

Constantes del sistema y parámetros metaheurísticos en el modelo

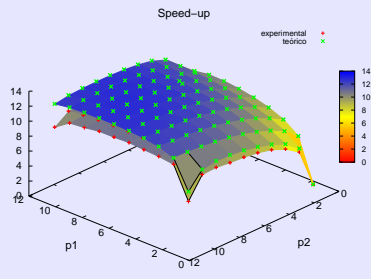
$F_{2-niveles}$	k_{s2}	NE	PM	IM
Mej-Ini	k_{mi}	NEIIni	PEMIIni	IMEIIni
Mej-Ref	k_{mr}	NEFIni	PEMMej	IMEMej
Mej-Com	k_{mc}	$2 \cdot (NMMCom + NMPCom + NPPCom)$	PEMMej	IMEMej
Div	k_d		PEDMej	IDEMej

Resultados experimentales. Modelado particular funciones

Speed-ups teórico y experimental variando el número de hilos del primer (y segundo nivel) de paralelismo para rutinas de uno y dos niveles de paralelismo en *Ben*



EM, rutina un-nivel



HEM, rutina dos-niveles

Análisis resultados

El modelo de tiempos en el **esquema metaheurístico (EM)** predice bien el comportamiento de la función de generación inicial de elementos para varios valores de $NEllni$, así como en las **hiperheurísticas basadas en el esquema metaheurístico (HEM)** para la función de mejora de la población inicial con $NEllni = 50$, $PEMIni = 50$ y $IMEIni = 1$.

Resultados experimentales. Modelado particular funciones

Hilos y speed-ups experimentales y modelados. Aplicación del EM a PCEPA en *Ben*

<i>NEIIni</i>	hilos		speed-up		
	exp	mod	exp	mod	exp-auto
100	48	55	27	27	25
500	121	122	77	61	75

EM, rutina un-nivel

<i>NEIIni</i>	<i>PEMIni</i>	<i>IMEIni</i>	hilos		speed-up		
			exp	mod	exp	mod	exp-auto
100	50	10	89	67	35	17	21
500	100	5	128	150	78	51	78

EM, rutina dos-niveles

Aplicación del HEM a PCEPA en *Ben*. Combinaciones de parámetros *NEIIni*, *PEMIni* y *IMEIni* (c1: 50,50,1; c2: 100,50,1)

<i>NEIIni</i>	hilos		speed-up		
	exp	mod	exp	mod	exp-auto
20	22	15	11	8	8
100	24	34	12	17	12

HEM, rutina un-nivel

Param	hilos		speed-up		
	exp	mod	exp	mod	exp-auto
c1	9×8	6×7	14	15	11
c2	9×4	8×9	15	24	14

HEM, rutina dos-niveles

Variables

- **exp**: speed-up experimental más alto.
- **mod**: speed-up modelado.
- **exp-auto**: speed-up experimental seleccionado a partir del número de hilos óptimo obtenido usando la metodología de autooptimización.

Análisis resultados

Al aplicar EM y HEM, el número de hilos y el speed-up seleccionados con la técnica de autooptimización cercanos a los mejores experimentales.

Resultados experimentales. Modelado particular funciones

Aplicación del EM a PCEPA en *Ben*. Combinaciones de parámetros *NEIlni*, *PEMlni* y *IMElni* (c1: 100,50,10; c2: 500,100,5)

<i>NEIlni</i>	hilos				speed-up			
	max	$\frac{max}{2}$	exp	mod	max	$\frac{max}{2}$	exp	exp-auto
100	128	64	48	55	20	23	27	25
500	128	64	121	122	73	49	77	75

EM, rutina un-nivel

Param	hilos				speed-up			
	max	$\frac{max}{2}$	exp	mod	max	$\frac{max}{2}$	exp	exp-auto
c1	128	64	89	67	27	15	35	21
c2	128	64	128	150	78	52	78	78

EM, rutina dos-niveles

Variables

- **max**: speed-up obtenido con el número máximo de hilos disponible.
- $\frac{max}{2}$: speed-up obtenido con la mitad del número máximo de hilos disponible.
- **exp**: speed-up experimental más alto.
- **exp-auto**: speed-up experimental seleccionado a partir del número de hilos óptimo (**mod**) obtenido usando la metodología de autooptimización.

Resultados experimentales. Modelado particular funciones

Aplicación del HEM a PCEPA en *Ben*. Combinaciones de parámetros *NElNi*, *PElNi* y *IMElNi* (c1: 50,50,1; c2: 100,50,1)

<i>NElNi</i>	hilos				speed-up			
	max	$\frac{max}{2}$	exp	mod	max	$\frac{max}{2}$	exp	exp-auto
20	128	64	22	15	11	11	11	8
100	128	64	24	34	11	11	12	12

HEM, rutina un-nivel

Param	hilos				speed-up			
	\sqrt{max}	$\sqrt{\frac{max}{2}}$	exp	mod	\sqrt{max}	$\sqrt{\frac{max}{2}}$	exp	exp-auto
c1	11×11	8×8	9×8	6×7	9	11	14	11
c2	11×11	8×8	9×4	8×9	11	12	15	14

HEM, rutina dos-niveles

Análisis resultados

El speed-up alcanzado con el modelo es casi siempre mejor que el obtenido al ejecutar de manera no óptima el máximo número de hilos disponible o su mitad, y se acerca al valor óptimo experimental en muchos casos.

Resultados experimentales. Modelado global del esquema

Constantes del modelo para todas las funciones del esquema. Aplicación del EM a PCEPA en *Saturno*

	Rutinas paralelas de un nivel			Rutinas paralelas de dos niveles		
	Ini	Com	Inc	Mej-Ini	Mej	Div
$k_S \cdot 10^4$	4.56	5.72	5.60	6.05	6.01	56.8
$k_{p,1} \cdot 10^4$	0.482	1.76	12.2	3.16	2.31	12.2
$k_{p,2} \cdot 10^4$	-	-	-	-0.05	37.1	-38.9

Constantes del modelo para todas las funciones del esquema. Aplicación del HEM a PCEPA en *Saturno*

	Rutinas paralelas de un nivel			Rutinas paralelas de dos niveles		
	Ini	Com	Inc	Mej-Ini	Mej	Div
$k_S \cdot 10^2$	1.47	2.95	0.302	26.2	26.2	26.6
$k_{p,1} \cdot 10^2$	0.096	0.593	0.465	3.27	2.43	2.07
$k_{p,2} \cdot 10^2$	-	-	-	2.74	1.68	3.56

Resultados experimentales. Modelado global del esquema

Valores de los parámetros metaheurísticos usados para los experimentos de autooptimización al aplicar el EM (metaheurísticas m1 y m2) y el HEM (hiperheurísticas h1 y h2) a PCEPA en *Saturno*

	NEIIni	NEFIIni	PEMIIni	IMEIIni	MCPIni	NEMSel
m1	75	50	75	20	-	10
m2	150	100	25	15	-	25
h1	10	10	100	1	7	5
h2	20	20	50	3	7	10

	NEPSel	NMMCom	NMPCom	NPPCom	PEMMej	IMEMej
m1	10	50	45	50	100	20
m2	25	100	90	100	40	10
h1	5	20	5	10	100	1
h2	10	50	10	5	20	3

	MCMMej	PEDMej	IDEMej	MCDMej	NEMInc	MLPInc
m1	-	15	15	-	10	-
m2	-	15	10	-	50	-
h1	7	100	1	7	10	7
h2	7	20	3	7	10	7

Justificación parámetros

Valores de los parámetros que producen metaheurísticas e hiperheurísticas de tamaño intermedio, permitiendo un estudio exhaustivo en un tiempo relativamente reducido.

Resultados experimentales. Autooptimización global del esquema

Parámetros de paralelismo seleccionados para cada función por el modelo con autooptimización para PCEPA en el sistema *Saturno*.

	Rutinas paralelas de un nivel			Rutinas paralelas de dos niveles		
	HGEIni	HCPCom	HIEInc	HM1Ini	HM1Mej	HD1Mej
m1	27	22	12	46	51	23
m2	38	31	17	33	32	26

nivel		Rutinas paralelas de un nivel			Rutinas paralelas de dos niveles		
		HGEIni	HCPCom	HIEInc	HM_Ini	HM_Mej	HD_Mej
h1	p_1	12	13	7	5	4	6
	p_2	-	-	-	4	6	4
h2	p_1	17	18	10	6	4	6
	p_2	-	-	-	7	6	4

Análisis resultados parámetros paralelismo

- **EM:** $p_2 = 1$. p_2 trabajan en la mejora del fitness pero no para reducir el tiempo de ejecución.
- En la práctica, si $p_1(\times p_2)_{modelo} > NumCores_{Saturno} \Rightarrow p_1(\times p_2)_{modelo} = NumCores_{Saturno}$.

Comparativa speed-up global autooptimización (exp-auto) - selección no óptima (\max y $\frac{\max}{2}$) en *Saturno*.

	max	speed-up	
		$\frac{\max}{2}$	exp-auto
m1	10	8	10
m2	14	10	16
h1	6	5	6
h2	6	6	7

Análisis resultados speed-up

- **EM:** exp-auto mejora o iguala \max y $\frac{\max}{2}$.
- **HEM:** speed-up más parecidos porque:
 - Reducido tamaño de las hiperheurísticas.
 - Sistema *Saturno* con un número de cores del orden de los tamaños poblacionales considerados.

Contenidos

- 1 Métodos de resolución y problemas de optimización
- 2 Ampliación y aplicaciones del esquema metaheurístico
- 3 Hiperheurísticas basadas en esquemas metaheurísticos
- 4 Metaheurísticas e hiperheurísticas en memoria compartida
- 5 Metaheurísticas en memoria distribuida**
 - Aplicación a sistemas computacionales homogéneos
 - Aplicación a sistemas computacionales heterogéneos
 - Autooptimización del esquema paralelo
- 6 Conclusiones y Trabajos futuros

Paralelización del esquema en memoria distribuida

Esquema de paso de mensajes. Modelo de Islas($S, ParamPar$)

EN PARALELO en cada proceso P_i ($i = 0, \dots, p - 1$) HACER
Inicializar($S_i, ParamIni$)

mientras (no CondiciónDeFin($ParamFin, NGMPar$)) **Hacer**

Esquema_Metaheurístico_Secuencial($S_i, NGMPar$)

Inmigrar($S_i, S_0, NEMPar$)

Si $i = 0$ **Entonces**

Integrar Subpoblaciones(S_0)

Fin si

Emigrar($S_0, S_i, NEMPar$)

Fin Mientras

FIN PARALELO

Solución: mejor $s_k \in S_0$

Esquema Metaheurístico Secuencial($S_i, NGMPar$)

mientras (no CondiciónDeMigración($NGMPar$))

Hacer

$SS_i = \text{Seleccionar}(S_i, ParamSel)$

$SS1_i = \text{Combinar}(SS_i, ParamCom)$

$SS2_i = \text{Mejorar}(SS1_i, ParamMej)$

$S_i = \text{Incluir}(SS2_i, ParamInc)$

Fin Mientras

Descripción

- Partición de datos homogénea entre procesos (islas o subpoblaciones): $|S_i| = \frac{|S|}{p}$, con $S = S_0 \cup \dots \cup S_{p-1}$.
- Nuevos parámetros:
 - **p**: Número de procesos.
 - **NEMPar**: Número de individuos a migrar, igual en inmigraciones y emigraciones.
 - **NGMPar**: Número de generaciones en cada isla antes de migrar.
- Migraciones entre trabajadores y maestro. No comunicación entre trabajadores.

Aplicación del esquema paralelo a PCEPA. Parámetros metaheurísticos

Valores de los parámetros metaheurísticos usados en los experimentos de memoria distribuida

	NEIIni	NEFIni	PEMIni	IMEIni	MCPIIni	NGMPar	NEMPar
m1	20	20	50	20	-	10	5
m2	100	50	100	10	-	10	5
m3	50	50	100	15	4	10	5
m4	100	100	100	15	8	10	5
m5	200	200	100	15	12	10	5
m6	20	20	100	20	12	5	5
m7	50	50	75	15	8	5	10
m8	100	100	50	10	4	5	15
m9	500	500	25	5	2	5	20

	NEMSel	NEPSel	NMMCom	NMPCom	NPPCom	PEMMej	IMEMej
m1	10	10	20	5	10	100	20
m2	25	25	100	20	5	50	10
m3	25	25	45	50	45	100	5
m4	50	50	90	100	90	100	5
m5	100	100	10	200	180	100	5
m6	10	10	15	20	15	100	5
m7	25	25	45	50	45	75	5
m8	50	50	90	100	90	50	5
m9	250	250	450	500	450	25	5

Parámetros metaheurísticos. Continuación

Valores de los parámetros metaheurísticos usados en los experimentos de memoria distribuida

	MCMMej	PEDMej	IDEMej	MCDMej	NEMInc	MLPInc
m1	-	50	20	-	10	-
m2	-	100	20	-	25	-
m3	4	10	5	4	25	4
m4	8	10	5	8	50	8
m5	12	10	5	12	100	12
m6	4	10	5	2	10	12
m7	4	10	5	2	25	15
m8	4	10	5	2	50	12
m9	4	10	5	2	250	15

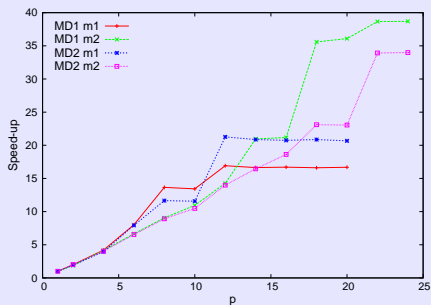
Justificación parámetros

- Amplia variedad de tamaños poblacionales (poblaciones entre 20 y 500 individuos).
- Valores razonables de $NGMPar$ (entre 5 y 10) y de $NEMPar$ (entre 5 y 20).
- Se han fijado 100 iteraciones como condición de finalización.

Aplicación a sistemas homogéneos. Comparativa MD - MC

Comparativa de fitness y speed-up con la aplicación del esquema de paso de mensajes y en memoria compartida a PCEPA 50-6 en *Saturno*

	Procesos MPI		Speed-up			MC	Fitness	
	MD1	MD2	MC	MD1	MD2		MD1	MD2
m1	12	12	7(-)	17(-)	21(+)	7704.39(+)	7735.39(~)	7842.02(-)
m2	22	22	9(-)	39(+)	34(-)	8139.18(-)	8050.83(-)	7903.52(+)

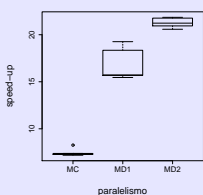
Speed-up vs p para paso de mensajes

Análisis resultados

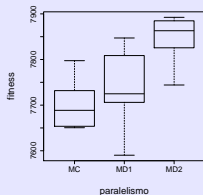
- Diferencias mínimas en algunas funciones básicas entre MD1 y MD2.
- MD mejora claramente a MC en speed-up (paralelismo de más alto nivel).
- Valores de fitness más próximos en todos los casos entre MC y MD.
- Test de Wilcoxon: MD2 presenta fitness significativamente mejor al aplicar m2.
- Speed-up superlineal para m2: mejor uso de la memoria y naturaleza cuadrática de algunas funciones.

Aplicación a sistemas homogéneos. Comparativa MD - MC

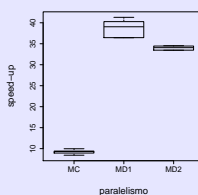
Resumen estadístico del speed-up y del fitness con la aplicación del esquema de paso de mensajes y en memoria compartida a PCEPA 50-6 en *Saturno*



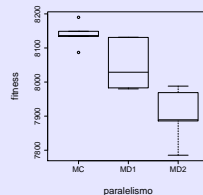
m1 - Speed-up



m1 - Fitness

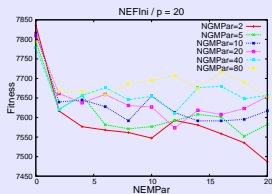


m2 - Speed-up

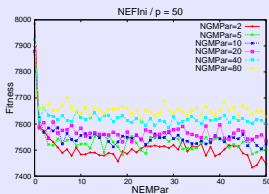


m2 - Fitness

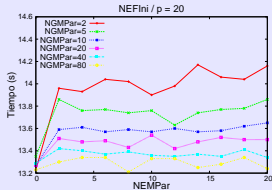
Diferencias significativas en las medias de speed-up y fitness para m1 y m2.

Aplicación a sistemas homogéneos. Influencia de *NEMPar* y *NGMPar*Fitness y tiempo de ejecución vs *NEMPar* (para varios *NGMPar*) en *Saturno*

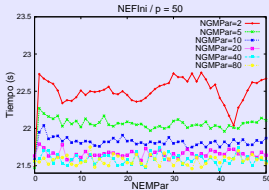
m8



m9



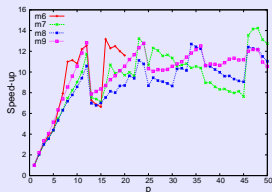
m8



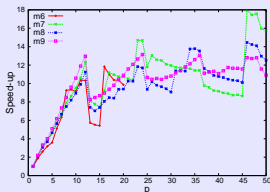
m9

Discusión resultados

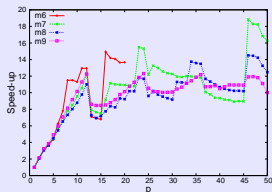
- Fitness ↓ hasta el 20 - 25 % de tasa de migración donde queda plano.
- *NGMPar* ↓ ⇒ ↓ Fitness y ↑ tiempo.
- Poca variación del tiempo vs *NEMPar*: coste envío elementos << coste inicio comunicaciones y coste computacional.
- Óptimos: *NEMPar* 20 - 25 % de migración; *NGMPar* en torno a 5 - 10.

Aplicación a sistemas homogéneos. Influencia de p Speed-up vs p en el clúster *Marte + Mercurio*

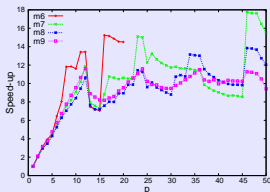
PCEPA 20-6



PCEPA 50-3



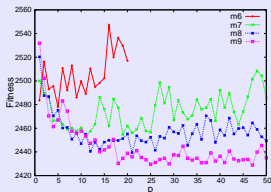
PCEPA 50-6



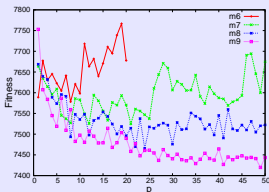
PCEPA 150-3

Discusión resultados

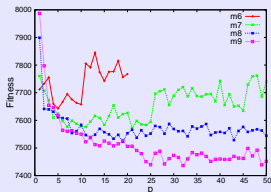
- *Marte + Mercurio* clúster con mayor coste comunicaciones que *Saturno*.
- Incremento lineal del speed-up hasta $p = 12$ (cores del clúster).
- Para $p > 12$, speed-up fluctúa debido balanceo progresivo de la carga.

Aplicación a sistemas homogéneos. Influencia de p Fitness vs p en el clúster *Marte + Mercurio*

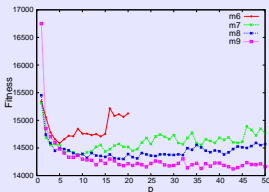
PCEPA 20-6



PCEPA 50-3



PCEPA 50-6



PCEPA 150-3

Discusión resultados

- $\exists \min(\text{fitness})$ en $p \approx \frac{NEFIn_i}{2}$ (se aprecia en series m6 y m7).
- Si $p > \frac{NEFIn_i}{2} \Rightarrow \text{fitness} \uparrow$ por pérdida de diversidad en subpoblaciones (islas con solo un individuo).
- En general, aconsejable p altos (poca pérdida de calidad de la solución y disminución notable del tiempo).

Aplicación del espuma en sistemas heterogéneos. Mapeo de procesos

Número de procesos lanzados en el sistema heterogéneo $Saturno(sat) + Marte(mar) + Mercurio(mer) + Luna(lun)$

		CSS	SSB	STB	0.1·STB	0.5·STB
m3	sat	24	30	31	3	12
	mar	6	8	7	1	3
	mer	6	7	7	1	3
	lun	4	5	5	1	2
	total	40	50	50	5	25
m4	sat	24	60	62	6	31
	mar	6	15	14	1	7
	mer	6	15	14	1	7
	lun	4	10	10	1	5
	total	40	100	100	10	50
m5	sat	24	120	122	12	61
	mar	6	30	28	3	14
	mer	6	30	28	3	14
	lun	4	20	22	2	11
	total	40	200	200	20	100

Mapeo de procesos

- *Cores Sin Sobrecarga (CSS)*: $p_{nodo,i} = NCores_{nodo,i}$.
- *Sobrecarga Sin Balancear (SSB)*: $p_{nodo,i} \propto NCores_{nodo,i}$, con $p_{total} = NEFlni$.
- *Sobrecarga Totalmente Balanceada (STB)*: $p_{nodo,i} \propto Velocidad_{nodo,i}$, con $p_{total} = NEFlni$.
- *ySTB*: $p_{nodo,i} \propto Velocidad_{nodo,i}$, con $p_{nodo,i} \times y$ (factor de escalado para reducir la sobrecarga).

Sistemas heterogéneos. Resultados experimentales

Speed-up, fitness e IC = $\frac{10^6}{f-t}$ alcanzado en el clúster *Saturno* + *Marte* + *Mercurio* + *Luna*

	CSS	SSB	STB
m3	34	41	41
m4	44	54	56
m5	38	61	59
Media	39	52	52

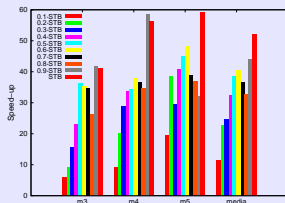
Speed-up

	CSS	SSB	STB
m3	7674.64	7719.67	7713.48
m4	7529.90	7646.13	7690.01
m5	7483.48	7611.97	7633.67
Media	7562.67	7659.26	7679.06

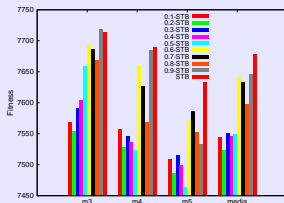
Fitness

	CSS	SSB	STB
m3	73(-)	86(~)	87(+)
m4	44(-)	53(-)	55(+)
m5	18(-)	29(+)	29(~)
Media	45	56	57

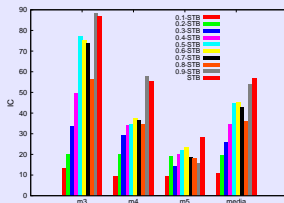
IC



Speed-up - ySTB



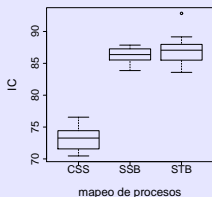
Fitness - ySTB



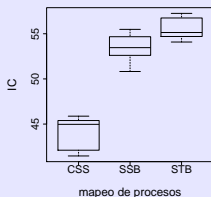
IC - ySTB

Sistemas heterogéneos. Resultados experimentales

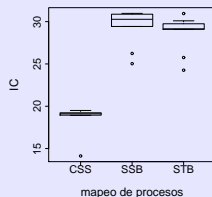
Resumen estadístico para el IC



m3



m4



m5

Análisis resultados

- Mismo speed-up medio de 52 (el más alto) para *SSB* y *STB*.
- $NCores_{totales} \uparrow \Rightarrow \uparrow$ Speed-up.
- El fitness no varía demasiado con el tipo de mapeo, pero sí con y en *ySTB*.
- Diferencias estadísticas significativas en todas las medias del *IC*.
- Test de Wilcoxon para el *IC*: *STB* mejor para m3 y m4; *SSB* mejor para m5.
- Mejor opción: *STB*, con $p_{total} \approx NEF_{ini}$.

Modelo de tiempos en memoria distribuida

Ecuaciones del modelo

$$t_{total} = t_{cmp} + t_{cmc} + t_{ord}, \quad \text{con } t_{ord} \approx 0$$

$$t_{cmp} = \sum_{i=1}^2 k_i \cdot \frac{Param_i}{p} + \left(\sum_{j=1}^6 k_j \cdot \frac{Param_j}{p} \right) \cdot NGMPar$$

$$t_{cmc} = t_{rec} + t_{dif}, \quad \text{con } t_{dif} \approx 0$$

$$t_{rec} = A \cdot p^3 + B \cdot p^2 + C \cdot p + D$$

Cálculo de p_{optimo} , despejando...

$$\frac{dt_{total}}{dp} = \frac{-K_{cmp}}{p^2} + 3 \cdot A \cdot p^2 + 2 \cdot B \cdot p + C = 0, \quad \text{con}$$

$$K_{cmp} = \sum_{i=1}^2 k_i \cdot Param_i + \left(\sum_{j=1}^6 k_j \cdot Param_j \right) \cdot NGMPar$$

Constantes del sistema y parámetros metaheurísticos en el modelo

<i>func</i>	k_j	<i>Param_j</i>
Com	k_c	$2 \cdot (NMMCom + NMPCom + NPPCom)$
Mej-Ref	k_{mr}	$\frac{NEFIni \cdot PEMMej \cdot IMEMej}{100}$
Mej-Com	k_{mc}	$\frac{(NMMCom + NMPCom + NPPCom) \cdot PEMMej \cdot IMEMej}{100}$
Div-Ref	k_{dr}	$\frac{NEFIni \cdot PEDMej \cdot IDEMej}{100}$
Div-Com	k_{dc}	$\frac{(NMMCom + NMPCom + NPPCom) \cdot PEDMej \cdot IDEMej}{100}$
Inc	k_i	$NEFIni + 2 \cdot (NMMCom + NMPCom + NPPCom) - NEMInc$

<i>func</i>	k_j	<i>Param_j</i>
Gen-Ini	k_g	<i>NEIIni</i>
Mej-Ini	k_{mi}	$\frac{NEIIni \cdot PEMIni \cdot IMEIni}{100}$

Autooptimización. Resultados experimentales

Constantes del sistema y parámetros metaheurísticos en *Saturno*

<i>func</i>	k_i	$Param_i$
Gen-Ini	$4.70 \cdot 10^{-3}$	50
Mej-Ini	$3.36 \cdot 10^{-4}$	$\frac{50 \cdot 75 \cdot 15}{100}$

<i>func</i>	k_j	$Param_j$
Com	$3.98 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot (45 + 50 + 45)$
Mej-Ref	$3.36 \cdot 10^{-4}$	$\frac{50 \cdot 75 \cdot 5}{100}$
Mej-Com	$6.72 \cdot 10^{-4}$	$\frac{(45+50+45) \cdot 75 \cdot 5}{100}$
Div-Ref	$3.53 \cdot 10^{-4}$	$\frac{50 \cdot 10 \cdot 5}{100}$
Div-Com	$7.06 \cdot 10^{-4}$	$\frac{(45+50+45) \cdot 10 \cdot 5}{100}$
Inc	$1.50 \cdot 10^{-5}$	$50 + 2 \cdot (45 + 50 + 45) - 25$

Speed-up en *Saturno*

	Procesos MPI		Speed-up		
	exp	mod	exp	mod	exp-auto
m6	16	20	15	11	12
m8	24	24	17	16	17

Discusión resultados

- Parámetros instalación: m7.
- $NGMP_{Par} = 1$ (mayor contribución de las comunicaciones, optimiza el fitness).
- p_{mod} y $speed-up_{mod} \approx p_{exp}$ y $speed-up_{exp}$.

Autooptimización. Resultados experimentales

Constantes del sistema y parámetros metaheurísticos en *Marte + Mercurio*

<i>func</i>	k_i	$Param_i$
Gen-Ini	$5.30 \cdot 10^{-3}$	50
Mej-Ini	$3.83 \cdot 10^{-4}$	$\frac{50 \cdot 75 \cdot 15}{100}$

<i>func</i>	k_j	$Param_j$
Com	$4.54 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot (45 + 50 + 45)$
Mej-Ref	$3.83 \cdot 10^{-4}$	$\frac{50 \cdot 75 \cdot 5}{100}$
Mej-Com	$7.66 \cdot 10^{-4}$	$\frac{(45+50+45) \cdot 75 \cdot 5}{100}$
Div-Ref	$3.92 \cdot 10^{-4}$	$\frac{50 \cdot 10 \cdot 5}{100}$
Div-Com	$7.84 \cdot 10^{-4}$	$\frac{(45+50+45) \cdot 10 \cdot 5}{100}$
Inc	$9.38 \cdot 10^{-6}$	$50 + 2 \cdot (45 + 50 + 45) - 25$

Speed-up en *Marte + Mercurio*

	Procesos MPI		exp	Speed-up	
	exp	mod		mod	exp-auto
m6	11	12	10	7	9
m8	12	12	8	9	8

Discusión resultados

- Constantes del sistema diferentes a las de *Saturno*. Necesidad de autooptimización.
- p_{mod} y $speed-up_{mod} \approx p_{exp}$ y $speed-up_{exp}$.
- Necesidad de más de 12 cores para m6 y m8 (mucho más peso de la computación que de las comunicaciones).

Autooptimización. Resultados experimentales

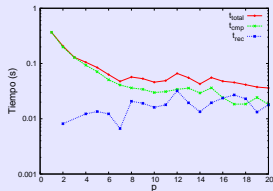
Speed-up *Júpiter + Luna + Saturno + Marte + Mercurio*

	Procesos MPI		Speed-up		
	exp	mod	exp	mod	exp-auto
m6	20	18	10	7	9
m8	38	26	18	13	11
m9	40	37	24	23	20

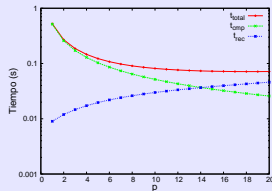
Discusión resultados

- Constantes del sistema: las de *Marte + Mercurio* (nodos más lentos).
- Orden de asignación de procesos a nodos: *Júpiter + Luna + Saturno + Marte + Mercurio* (1° los más rápidos).
- p_{mod} y $speed-up_{mod} \approx p_{exp}$ y $speed-up_{exp}$.
- Contribución comunicaciones en m8 mayor que en m6.
- Los resultados indican que no se requieren más cores (existencia de mínimos en t_{total}).

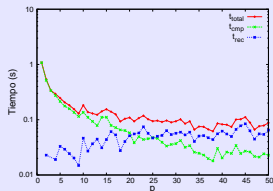
Tiempos experimentales y modelados



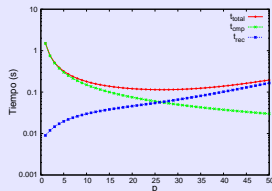
m6 — tiempo experimental



m6 — tiempo modelado



m8 — tiempo experimental



m8 — tiempo modelado

Contenidos

- 1 Métodos de resolución y problemas de optimización
- 2 Ampliación y aplicaciones del esquema metaheurístico
- 3 Hiperheurísticas basadas en esquemas metaheurísticos
- 4 Metaheurísticas e hiperheurísticas en memoria compartida
- 5 Metaheurísticas en memoria distribuida
- 6 Conclusiones y Trabajos futuros

Conclusiones

- Aplicación satisfactoria de un esquema parametrizado de metaheurísticas a dos problemas de optimización en ciencias e ingeniería.
- Se hecho un estudio detallado de la inclusión de una nueva metaheurística en el esquema, aumentando el número de parámetros y de combinaciones de metaheurísticas a aplicar.
- Las hiperheurísticas basadas en esquemas metaheurísticos mejoran los resultados obtenidos con la aplicación directa de las metaheurísticas, reduciendo la dependencia del problema.
- La paralelización del esquema en memoria distribuida ha resultado más eficaz que en memoria compartida, permitiendo una reducción mayor de los tiempos de ejecución.
- El modelado y autooptimización del esquema metaheurístico permite seleccionar de forma automática los parámetros de paralelismo óptimos para cada sistema.

Trabajos Futuros

- Ampliar el número de metaheurísticas con la introducción de nuevos parámetros en el esquema.
- Adaptar el esquema metaheurístico parametrizado a problemas multiobjetivo.
- Aplicar las hiperheurísticas a otros problemas de optimización, más ampliamente estudiados, para contrastar nuestro enfoque.
- Aplicar el paralelismo de paso de mensajes a hiperheurísticas (con un coste computacional elevado).
- Paralelización del esquema metaheurístico y diseño de modelos de tiempo en GPU e híbridos.
- Diseño de esquemas de paso de mensajes con una distribución de datos heterogénea.
- Aplicación de la metodología a otros problemas de optimización.