



Tesis Doctoral

Búsqueda Heurística en Planificación Basada en Costes

Raquel Fuentetaja Pizán

Universidad Carlos III de Madrid

Directores: Daniel Borrajo Millán y Carlos Linares López



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición declarativa

Generalización

Heurísticas no numéricas

4 Algoritmos de Búsqueda

5 Resultados Experimentales

6 Contribuciones y Trabajos Futuros

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

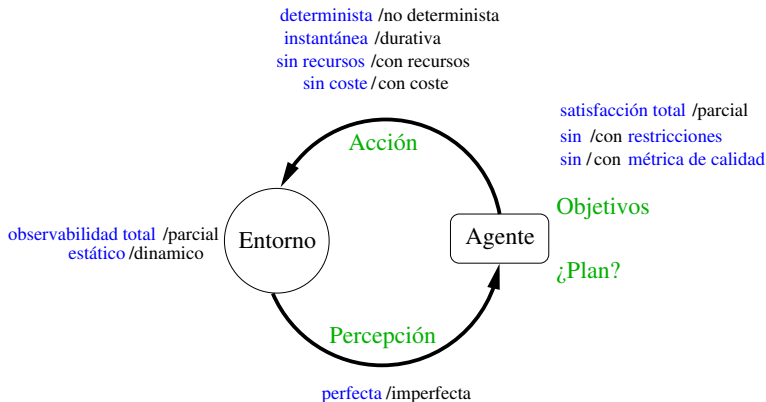
Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Planificación automática



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

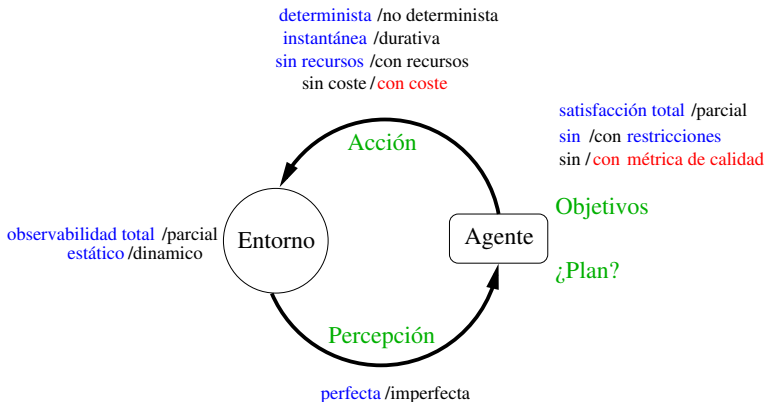
Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Planificación basada en costes



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

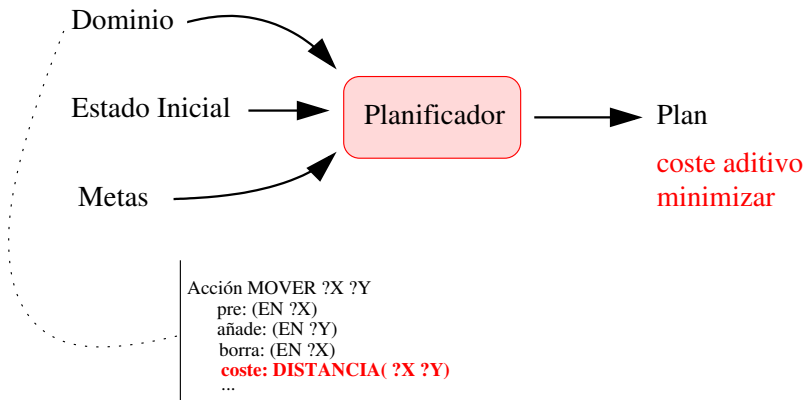
Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Planificación basada en costes



Tesis Doctoral

Estado de la cuestión: planificadores

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Búsqueda heurística	Tipo de búsqueda	
Espacio de estados	determinista	estocástica
clásico	Metric-FF [Hoffmann03] SAPA [Do&Kambhampati03] MO-GRT [Refanidis&Vlahavas03] SimPlanner [Sapena&Onaindia04] SGPlan [Chen et.al.04] Lama [Richter&Westphal08]	
grafos de acciones		LPG [Gerevini et.al03]

- Subóptimos
- Óptimos derivados de HSP [Haslum&Geffner01]

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Estado de la cuestión: heurísticas numéricas

Independientes del dominio

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Grafos Relajados	Otros
<p>Metric-FF [Hoffmann03]</p> <p>SAPA [Do&Kambhampati03]</p> <p>SimPlanner [Sapena&OnaIndia04]</p>	<p>aditiva [Bonet&Geffner01]</p> <p>max [Bonet&Geffner01]</p> <p>h^m [Haslum&Geffner00]</p> <p>h_a [Keyder&Geffner08]</p> <p>set-additive [Keyder&Geffner08]</p> <p>h_{pmax} [Mirkis&Domshlak08]</p> <p>MO-GRT [Refanidis&Vlahavas03]</p> <p>PDBs [Edelkamp01]</p> <p>landmarks [Porteous et.al.01,Richter et.al.08]</p> <p>grafos causales [Helmert04]</p>

- No se ha determinado formalmente la relación entre ellas

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Estado de la cuestión: algoritmos de búsqueda

Tipo	Planificadores	Inconvenientes
<p>Mejor primero</p> $f(n) = W \times h(n) + g(n)$	<p>Metric-FF</p> <p>SAPA</p> <p>MO-GRT</p>	<p>Escalabilidad</p>
<p>Esquemas avaros</p>	<p>SimPlanner</p> <p>[Keyder&Geffner08]</p>	<p>Incompletos</p> <p>¿Calidad?</p>

- No admisibles
- No se han estudiado otros algoritmos de búsqueda
- El uso de heurísticas no numéricas se ha evaluado mínimamente
 - Acciones útiles [Hoffmann01]
 - Estados *lookahead* [Vidal04]

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición declarativa

Generalización

Heurísticas no numéricas

4 Algoritmos de Búsqueda

5 Resultados Experimentales

6 Contribuciones y Trabajos Futuros

Tesis Doctoral

Objetivos

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Objetivos	Contribuciones
Heurísticas Nuevas heurísticas Relación teórica	Generación de una nueva heurística numérica Marco teórico general para heurísticas numéricas Adaptación de heurísticas no numéricas
Algoritmos Escalabilidad Calidad	Adaptación de tres tipos de algoritmos de búsqueda
Experimentos Marco común	Planificador parametrizado CBP Comparación experimental aislando heurísticas Resultados competitivos

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición declarativa

Generalización

Heurísticas no numéricas

4 Algoritmos de Búsqueda

5 Resultados Experimentales

6 Contribuciones y Trabajos Futuros

Tesis Doctoral

Heurística h_{level} Raquel
Fuentetaja
Pizán

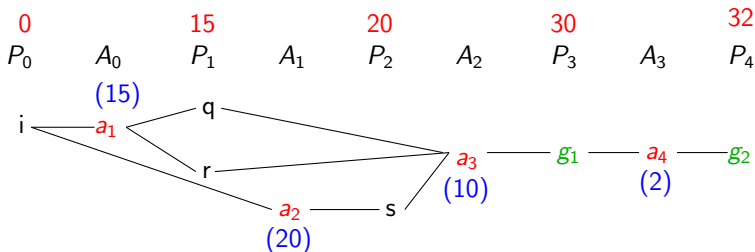
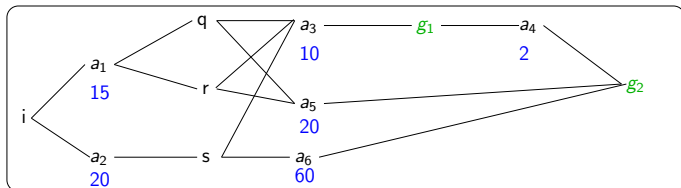
Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level} Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricasAlgoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

$$h_{\text{level}} = c(a_1) + c(a_2) + c(a_3) + c(a_4) = 47 \text{ (RP Óptimo)}$$

$$h_{\text{mff}} = c(a_1) + c(a_2) + c(a_3) + c(a_5) = 65$$

Tesis Doctoral

Relación con otros algoritmos basados en RPGs

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición
declarativa

Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Construcción	Parada	A_i	P_{i+1}	Costes
Metric-FF	$\mathcal{G} \subseteq P_i$	aplicables en P_i	generadas por A_i	no
h_{level}	$\mathcal{G} \subseteq P_i$	menor coste	generadas por A_i	acc. 1ª capa apl. suma
SAPA	$P_i = P_{i+1}$	aplicables en P_i	generadas por A_i	acc. y prop. suma/máx
SimPlanner	$\mathcal{G} \subseteq P_i$	aplicables en P_i	menor coste	prop. suma

Extracción	Selección “mejor” acción que genera cada (sub)meta
Metric-FF	capa mínima
h_{level}	capa mínima
SAPA	coste mínimo

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

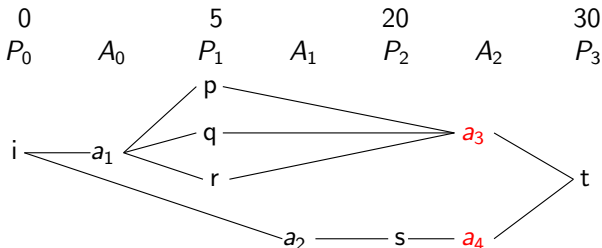
Heurísticas

Heurística h_{level} Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricasAlgoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Empates en la extracción



Adaptación de la heurística de la dificultad

dificultad $_{h_{level}}$ (a_3) = $coste(p) + coste(q) + coste(r) = 15$

dificultad $_{h_{level}}$ (a_4) = $coste(s) = 20$

Acción seleccionada: a_3

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición
declarativa

Generalización

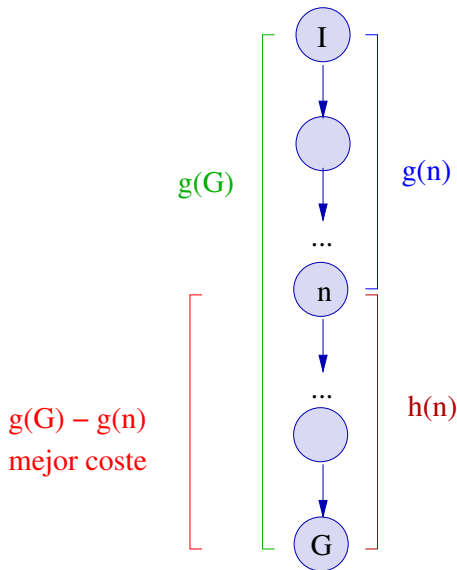
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Experimentos preliminares



Tesis Doctoral

Resultados: 5 dominios

Raquel
Fuentetaja
Pizán

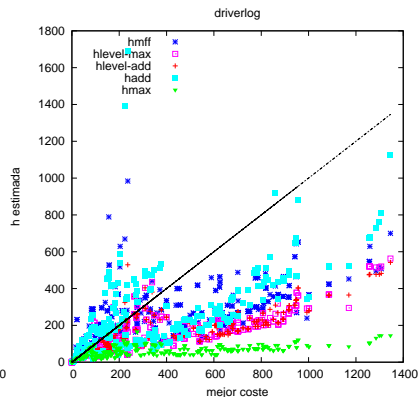
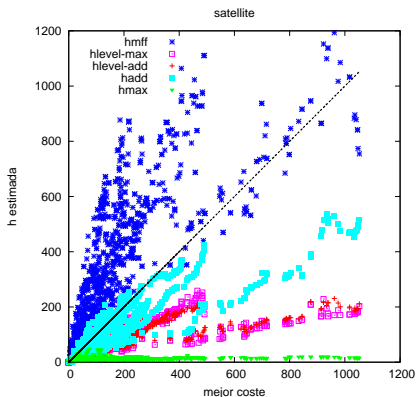
Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level} Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricasAlgoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level} **Definición
declarativa**

Generalización

Heurísticas no
numéricasAlgoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Heurísticas

Heurística h_{level} **Definición declarativa**

Generalización

Heurísticas no numéricas

4 Algoritmos de Búsqueda

5 Resultados Experimentales

6 Contribuciones y Trabajos Futuros

Tesis Doctoral

Relación entre heurísticas

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados

Experimentales

Contribuciones

y Trabajos

Futuros

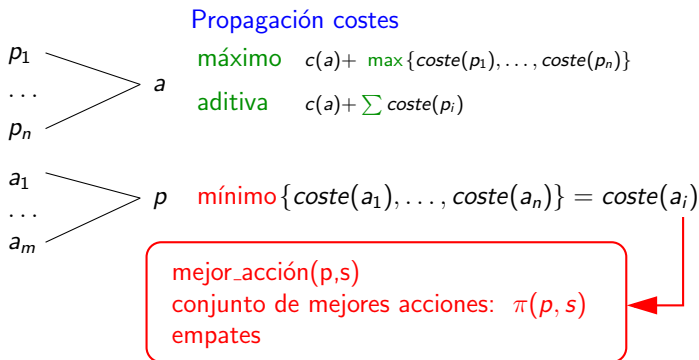
Def. procedural	Def. declarativa
Metric-FF	aditiva
SAPA	max
SimPlanner	h^m
h_{level}	h_a
	set-additive
	h_{pmax}

$$coste_optimo(\mathcal{G}, s) = \sum_{a \in \mathcal{A}} N(a) \times c(a)$$

$$h(\mathcal{G}, s) = \sum_{a \in \mathcal{A}} N'(a) \times c(a)$$

Def. declarativa de las heurísticas basadas en RPGs

- Caracterización matemática de las acciones implicadas en el cálculo de las heurísticas



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición
declarativa

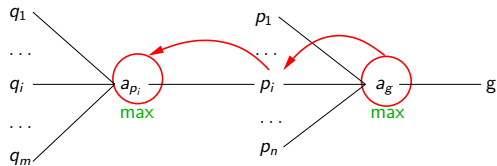
Generalización

Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Definiciones base

$$\pi_{max}(g, s)$$



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición
declarativa

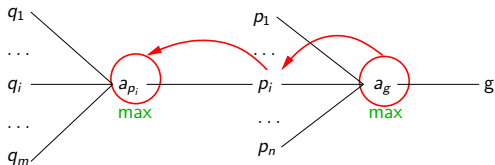
Generalización

Heurísticas no
numéricas

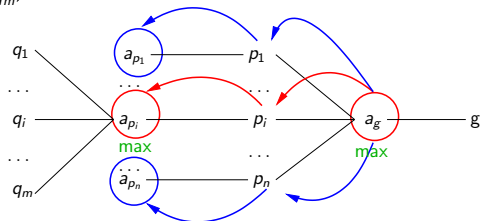
Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Definiciones base

$$\pi_{max}(g, s)$$



$$\pi_{max}^+(g, s)$$



Tesis Doctoral

Definiciones base

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}

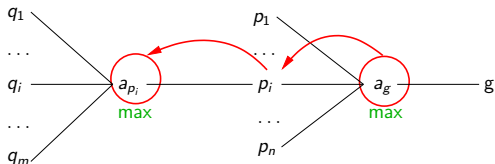
Definición
declarativa

Generalización

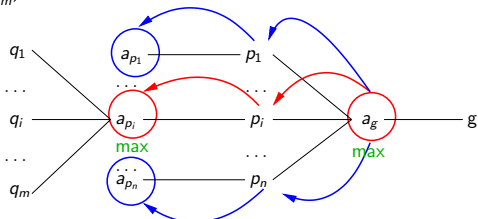
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

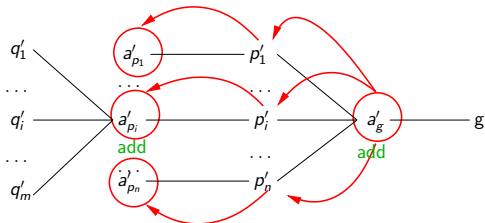
$$\pi_{max}(g, s)$$



$$\pi_{max}^+(g, s)$$



$$\pi_{add}(g, s)$$



Tesis Doctoral

Definiciones declarativas y relaciones

Heurística	Definición $h(\mathcal{G}, s)$	$N'(a)$	Empates
Metric-FF	$\sum_{\forall a \in \pi_{\text{max-unit}}^+(\mathcal{G}, s)} c(a)$	$N'(a) = 1$ $\forall a \in \pi_{\text{max-unit}}^+(\mathcal{G}, s)$	h dificultad
$h_{\text{level-max}}$ SAPA(max)	$\sum_{\forall a \in \pi_{\text{max}}^+(\mathcal{G}, s)} c(a)$	$N'(a) = 1$ $\forall a \in \pi_{\text{max}}^+(\mathcal{G}, s)$	h dificultad arbitraria
SAPA(add) h_a SimPlanner $h_{\text{level-add}}$	$\sum_{\forall a \in \pi_{\text{add}}^+(\mathcal{G}, s)} c(a)$	$N'(a) = 1$ $\forall a \in \pi_{\text{add}}^+(\mathcal{G}, s)$	arbitraria arbitraria h dificultad
max	$\max_{\forall g \in \mathcal{G}} h_{\text{max}}(g, s)$	$N'(a) = 1$ $\forall a \in \pi_{\text{max}}(\mathcal{G}, s)$	indiferente
aditiva	$\sum_{\forall g \in \mathcal{G}} h_{\text{add}}(g, s)$	$N'(a) \geq 1$ $\forall a \in \pi_{\text{add}}(\mathcal{G}, s)$	indiferente

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level} Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricasAlgoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición declarativa

Generalización

Heurísticas no numéricas

4 Algoritmos de Búsqueda

5 Resultados Experimentales

6 Contribuciones y Trabajos Futuros

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

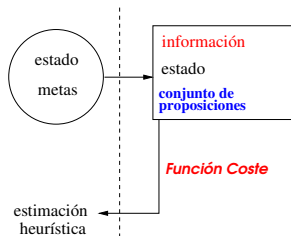
Heurística h_{level}
Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Esquema de cálculo de heurísticas unificado



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

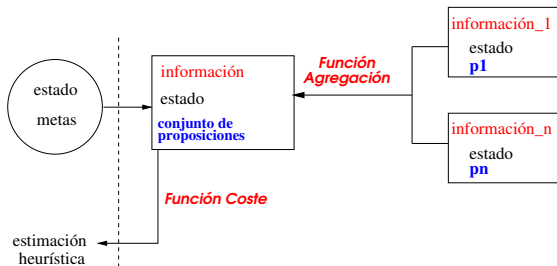
Heurística h_{level}
Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Esquema de cálculo de heurísticas unificado



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

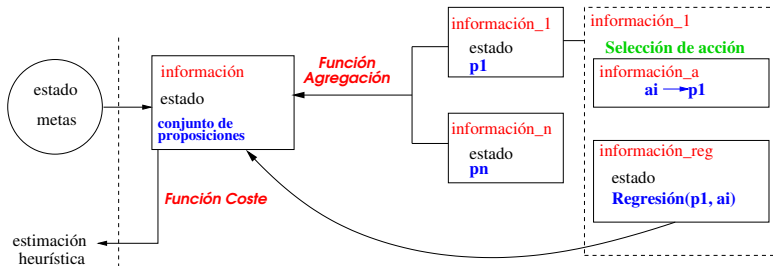
Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Esquema de cálculo de heurísticas unificado



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

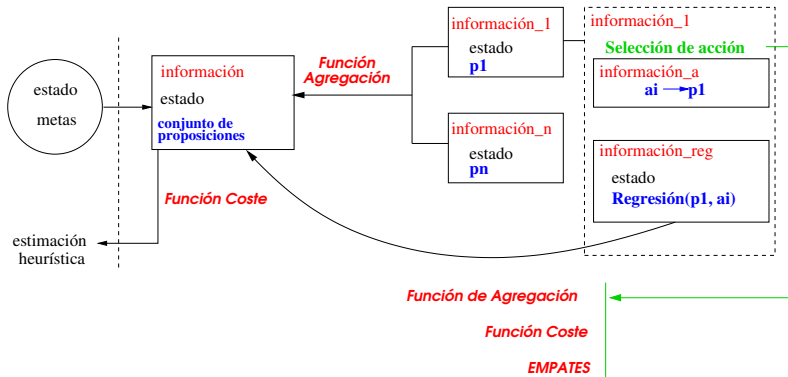
Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Esquema de cálculo de heurísticas unificado



Esquema de cálculo de heurísticas unificado

**Raquel
Fuentetaja
Pizán**

Introducción

Objetivos

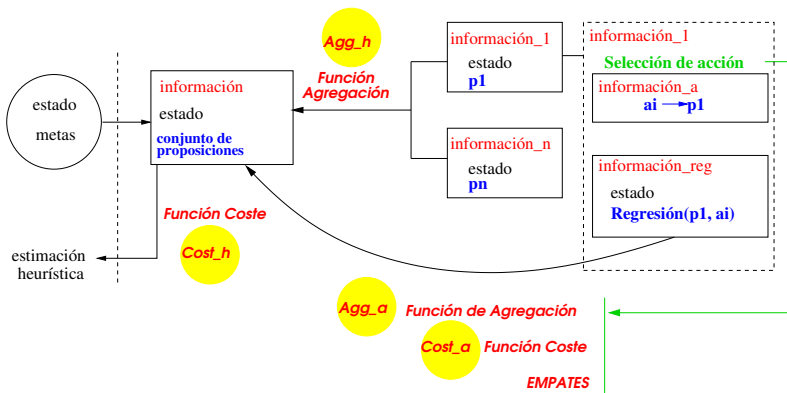
Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de Búsqueda

Resultados Experimentales

Contribuciones y Trabajos Futuros



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Información relevante general

- Información
 - ¿Qué acciones se seleccionan?
 - ¿Qué proposición genera cada acción seleccionada?
 - ¿Cuántas veces se ejecuta cada acción para generar cada proposición?
- Representación: **multiconjuntos de pares acción-proposición**

$$M = \{((a, p), \#ocurrencias), \dots\}$$

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Funciones de agregación: $M^n \rightarrow M$

$$M_1 = \{((a_1, p), 2), ((a_2, q), 1)\}$$

$$M_2 = \{((a_1, p), 1), ((a_3, r), 1)\}$$

- **Agg-union+**:

$$\{((a_1, p), 3)), ((a_2, q), 1), ((a_3, r), 1)\}$$

- **Agg-union-max**:

$$\{((a_1, p), 2)), ((a_2, q), 1), ((a_3, r), 1)\}$$

- **Agg-max**: selecciona el que maximiza una función de coste

$$\{((a_1, p), 1)), ((a_3, r), 1)\}$$

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Funciones de coste: $M \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$

$$M = \{((a1, p), 2), ((a2, q), 1), ((a2, r), 3)\}$$

- Cost-single:

$$coste(a1) + coste(a2)$$

- Cost-multiple:

$$2 \times coste(a1) + 4 \times coste(a2)$$

- Cost-single-eff:

$$\frac{coste(a1)}{\#eff^+(a1)} + 2 \times \frac{coste(a2)}{\#eff^+(a2)}$$

Tesis Doctoral

Instanciaciones

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Heurística	m	Agg_{ap}	Agg_h	$Cost_{ap}$	$Cost_h$
aditiva	1	<i>Agg-union+</i>	<i>Agg-union+</i>	<i>Cost-multiple</i>	<i>Cost-multiple</i>
max h^m	1	<i>Agg-max</i> con <i>Cost-single</i>	<i>Agg-max</i> con <i>Cost-single</i>	<i>Cost-single</i>	<i>Cost-single</i>
h^m	> 1	<i>Agg-max</i> con <i>Cost-single</i>	<i>Agg-max</i> con <i>Cost-single</i>	<i>Cost-single</i>	<i>Cost-single</i>
mff	1	<i>Agg-max</i> con <i>Cost-single</i>	<i>Agg-union+</i>	<i>Cost-single-unit</i>	<i>Cost-single</i>
level-max sapa-max	1	<i>Agg-max</i> con <i>Cost-single</i>	<i>Agg-union+</i>	<i>Cost-single</i>	<i>Cost-single</i>
level-add sapa-add h_a	1	<i>Agg-union+</i>	<i>Agg-union+</i>	<i>Cost-multiple</i>	<i>Cost-single</i>
set-additive	1	<i>Agg-union+</i>	<i>Agg-union+</i>	<i>Cost-single</i>	<i>Cost-single</i>
h_{pmax}	1	<i>Agg-union-max</i>	<i>Agg-union-max</i>	<i>Cost-single-eff</i>	<i>Cost-single-eff</i>

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización

**Heurísticas no
numéricas**

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición declarativa

Generalización

Heurísticas no numéricas

4 Algoritmos de Búsqueda

5 Resultados Experimentales

6 Contribuciones y Trabajos Futuros

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición
declarativa

Generalización

**Heurísticas no
numéricas**

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Acciones útiles: h_{level}

- **Adaptación a Planificación Basada en Costes**
- Acciones aplicables que generan submetas del RPG:
 - ① De nivel 1
 - ② Generadas por acciones seleccionadas
 - ③ Generadas por acciones seleccionadas aplicables

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
**Heurísticas no
numéricas**

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Acciones útiles: h_{level}

- **Adaptación a Planificación Basada en Costes**
- Acciones aplicables que generan submetas del RPG:
 - ① De nivel 1
 - ② Generadas por acciones seleccionadas **79.1%**
 - ③ Generadas por acciones seleccionadas aplicables **83.7%**

Experimento en 8 dominios: problemas resueltos

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
**Heurísticas no
numéricas**

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Acciones útiles: h_{level}

- **Adaptación a Planificación Basada en Costes**
- Acciones aplicables que generan submetas del RPG:
 - ① De nivel 1
 - ② Generadas por acciones seleccionadas 79.1%/1.8%
 - ③ Generadas por acciones seleccionadas aplicables 83.7%/26.5%

Experimento en 8 dominios: problemas resueltos / calidad

Tesis Doctoral

Estados *lookahead*

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
**Heurísticas no
numéricas**

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

- **Adaptación a Planificación Basada en Costes**
- Procedimiento que determina el orden de las acciones
 - Nivel en que se requieren las submetas
 - Submetas causalmente necesarias

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
**Heurísticas no
numéricas**

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Heurísticas: resumen

- Heurísticas h_{level}
- Definición declarativa (RPGs)
- Definición generalizada
 - Algunas heurísticas son *equivalentes* (misma política empates)
 - Nuevas heurísticas
- Adaptación de otras heurísticas
 - Dificultad
 - Acciones útiles
 - Estados *lookahead*

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición declarativa

Generalización

Heurísticas no numéricas

4 Algoritmos de Búsqueda

5 Resultados Experimentales

6 Contribuciones y Trabajos Futuros

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Algoritmos de búsqueda

Aproximación

- Escalabilidad: encontrar rápidamente una solución
- Calidad: mejorar la solución encontrada con BnB

Algoritmos

- Primera solución
 - *Enforced Hill Climbing* adaptado para costes (CEHC)
 - *Hill Climbing* con backtracking (HC-B)
 - *Mejor primero* ampliado con estados *lookahead*
- Soluciones siguientes: BnB utilizando el coste de la mejor solución encontrada para podar estados con $g(n)$ mayor

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricas

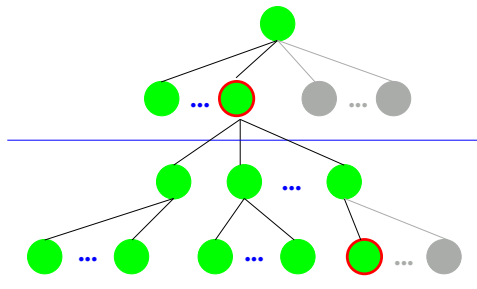
Algoritmos de
Búsqueda

Resultados

Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Cost-based Enforced Hill Climbing (CEHC)



- Acciones útiles adaptadas
- Dos aproximaciones:
 - 1 Ordenación de sucesores según $c(a)$, y $f(n) = h(n)$
 - 2 Ordenación en el primer nivel según $f(n) = c(a) + h(n)$

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

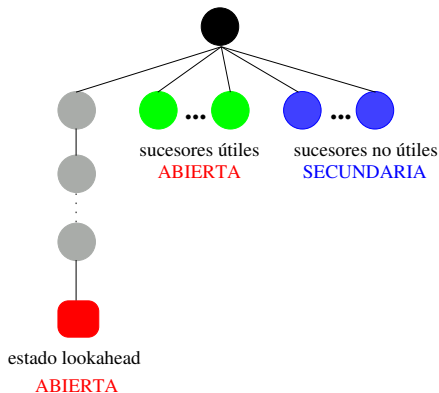
Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Mejor primero *lookahead*



- Estados lookahead adaptados
- Acciones útiles adaptadas: lista secundaria

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición declarativa

Generalización

Heurísticas no numéricas

4 Algoritmos de Búsqueda

5 Resultados Experimentales

6 Contribuciones y Trabajos Futuros

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Marco Experimental

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

- Marco común: planificador CBP (*Cost-Based Planner*)
- Dominios: 8 dominios
- Tiempo límite (1800 sg.)
- Otros planificadores: Metric-FF, LPG, LAMA

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

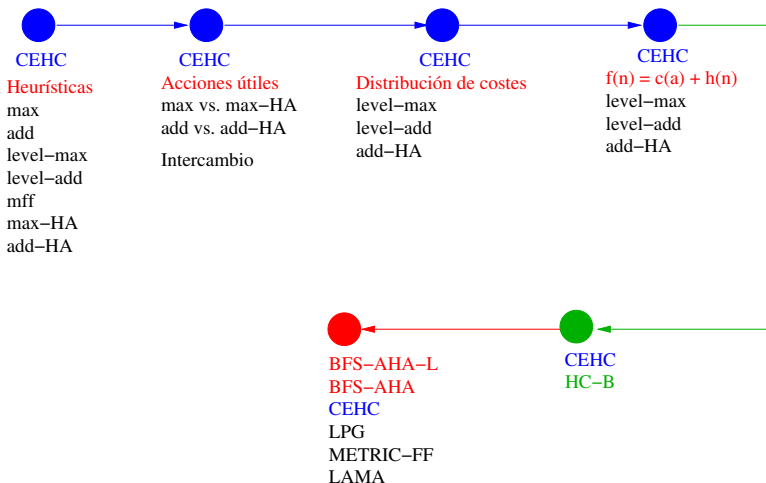
Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Experimentos



Tesis Doctoral

CEHC: heurísticas

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

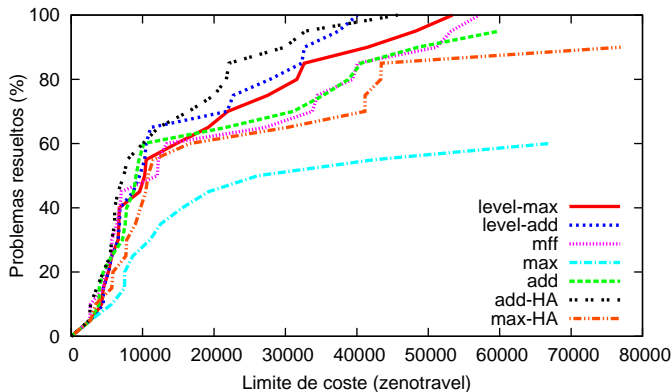
Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición
declarativa

Generalización

Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

- Mejor comportamiento: add-HA, level-add, level-max

Tesis Doctoral

Experimentos

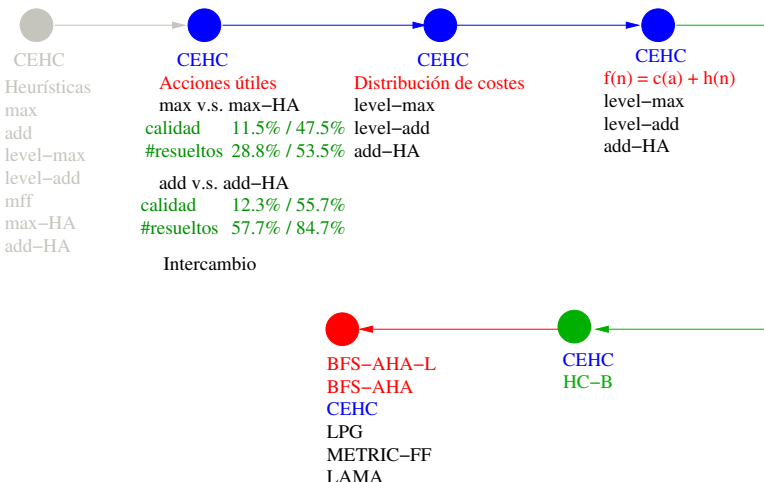
Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

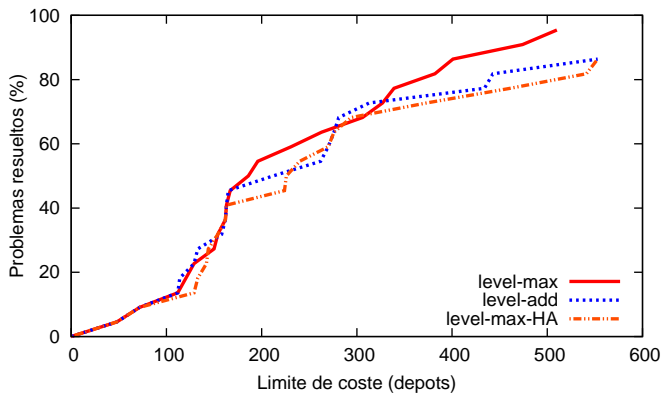
Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

CEHC: intercambio de acciones útiles



- Gran influencia de las acciones útiles

Tesis Doctoral

Experimentos

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

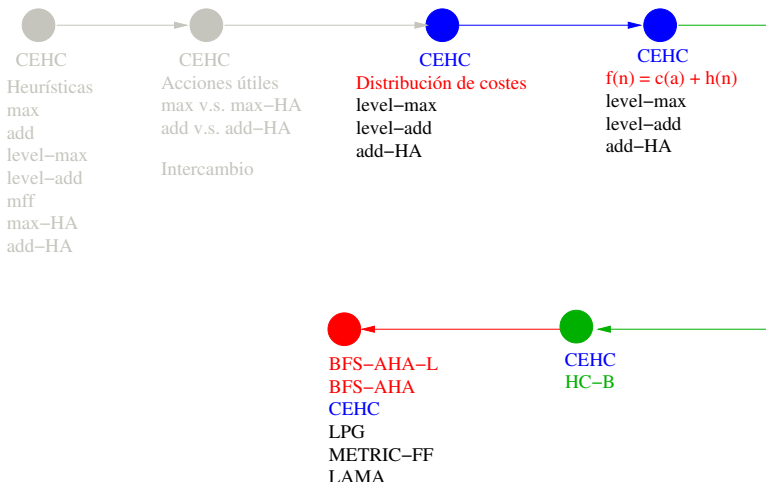
Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

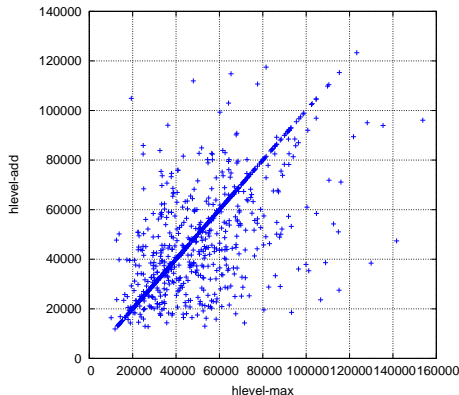
Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

CEHC: distribuciones de coste aleatorias



- Comportamiento dependiente de la distribución de costes

Tesis Doctoral

Experimentos

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

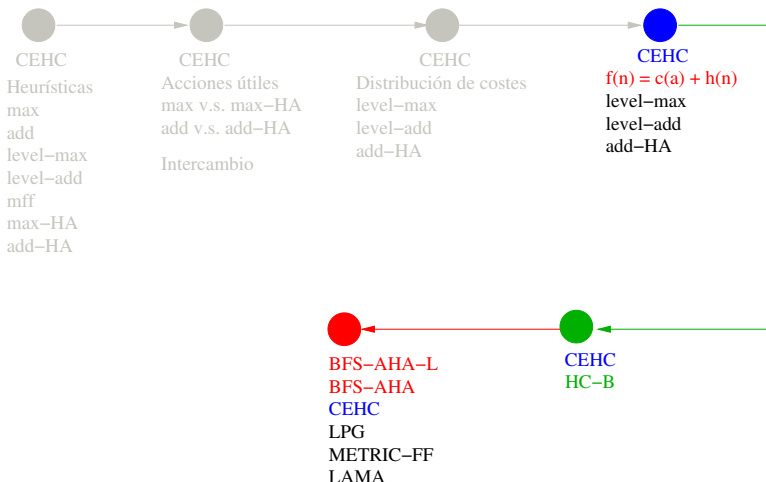
Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros



Tesis Doctoral

CEHC: aproximaciones

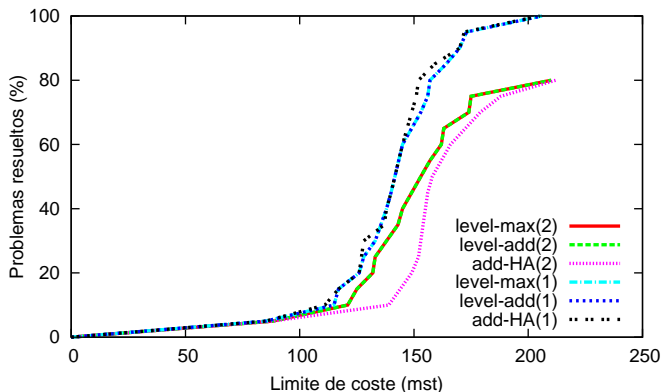
Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

- Comportamiento más adecuado con $f(n) = h(n)$ y ordenando sucesores según $c(a)$, que con $f(n) = c(a) + h(n)$

Tesis Doctoral

Experimentos

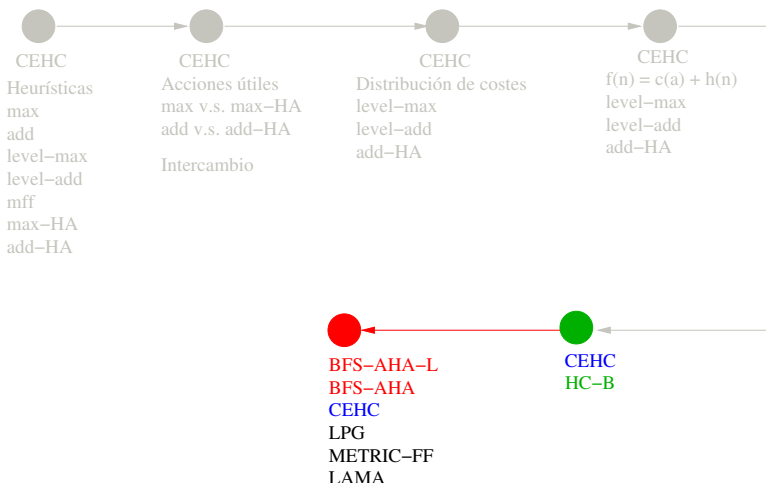
Raquel
Fuentetaja
Pizán

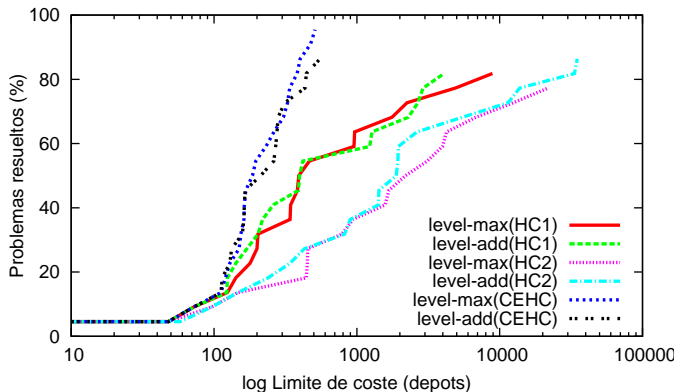
Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros



- CEHC obtiene en general mejores calidades que HC

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

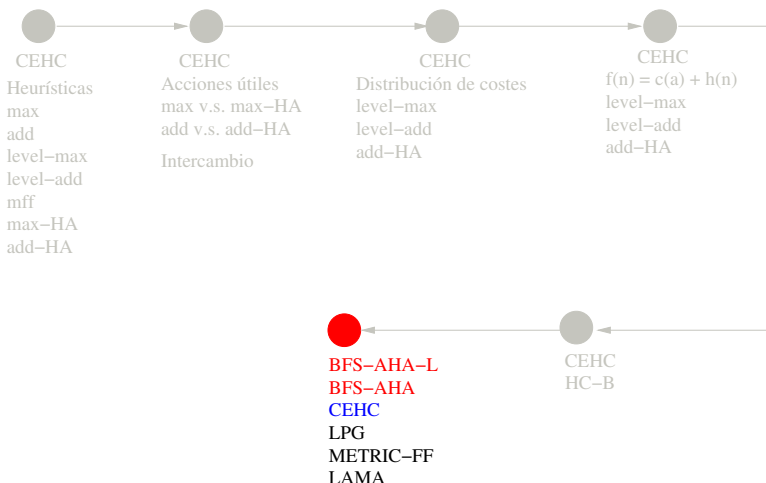
Objetivos

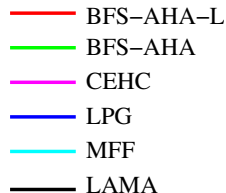
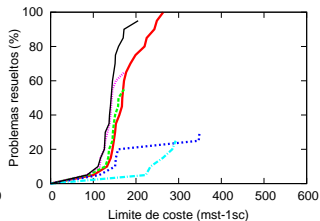
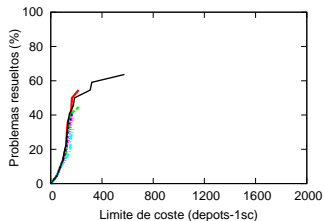
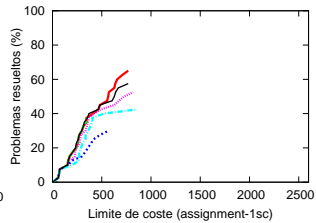
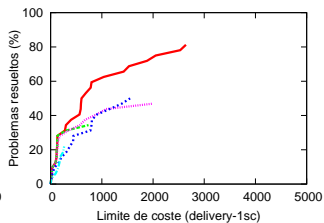
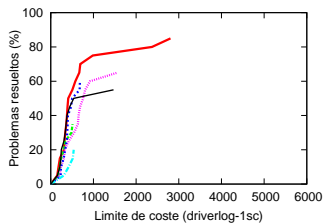
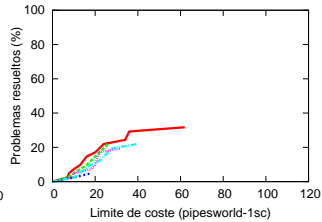
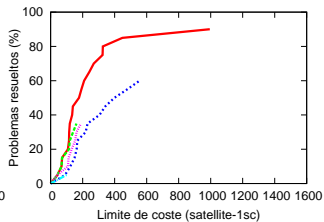
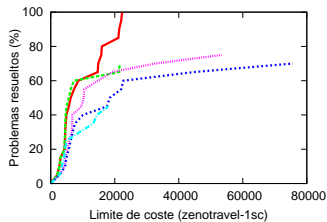
Heurísticas

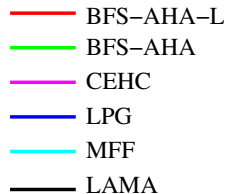
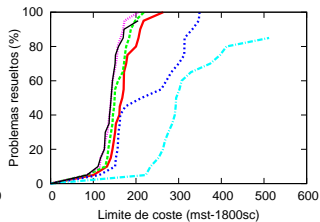
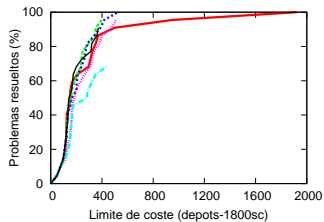
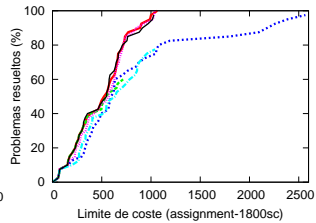
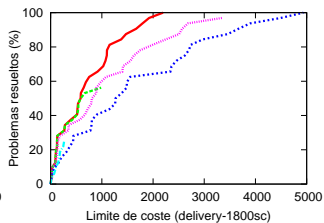
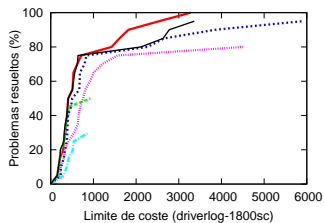
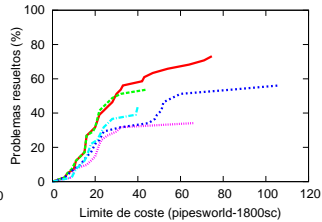
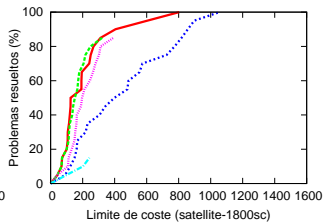
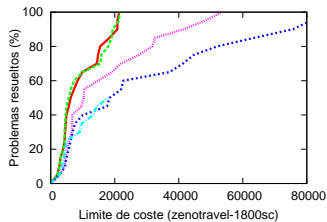
Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

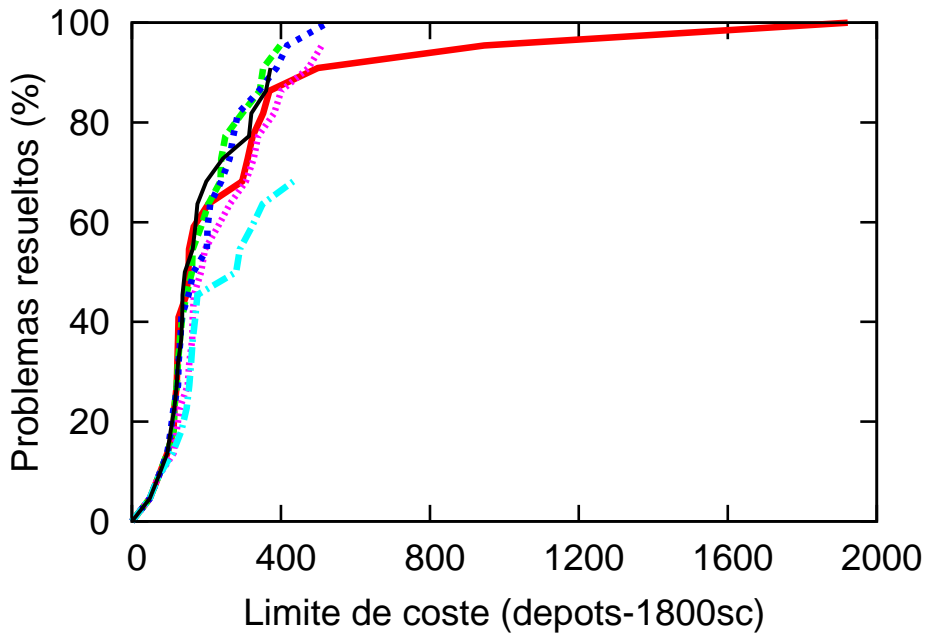
Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

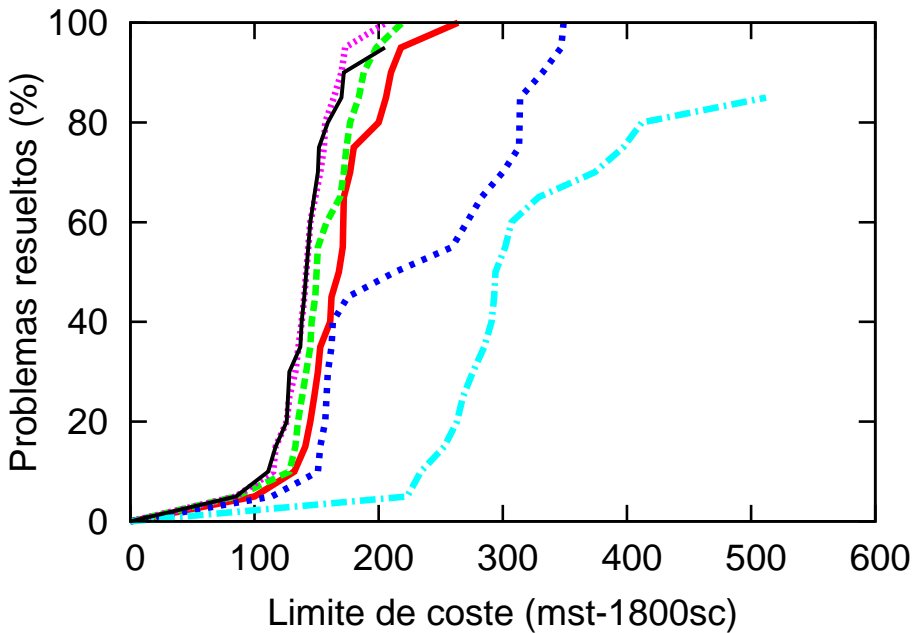
Experimentos











Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Conclusiones

- Heurísticas numéricas: h_{level} y h_{add} con acciones útiles
- Heurísticas no numéricas sensibles a costes: adecuadas para mejorar la escalabilidad con calidades aceptables
- La búsqueda mejor primero lookahead BnB es más efectiva que los otros esquemas en 6 de los 8 dominios
 - Encuentra la primera solución rápidamente y el BnB tiene capacidad de mejora de la solución
 - Los resultados son competitivos
- Problemas: dominios con muchas interacciones entre metas

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Heurísticas

Heurística h_{level}

Definición declarativa

Generalización

Heurísticas no numéricas

4 Algoritmos de Búsqueda

5 Resultados Experimentales

6 Contribuciones y Trabajos Futuros

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
BúsquedaResultados
ExperimentalesContribuciones
y Trabajos
Futuros

Contribuciones

- Heurísticas
 - Heurísticas h_{level}
 - Marco teórico común para definir heurísticas
 - Adaptación a planificación basada en costes de:
 - La heurística de la dificultad
 - La heurística de las acciones útiles
 - La heurística *lookahead*
- Algoritmos de búsqueda: adaptación y aplicación de distintos algoritmos de búsqueda a planificación basada en costes combinados con BnB
- Planificador CBP
- Comparación experimental de los algoritmos/heurísticas

Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Trabajos futuros

Introducción

Objetivos

Heurísticas

Heurística h_{level}
Definición
declarativa
Generalización
Heurísticas no
numéricas

Algoritmos de
Búsqueda

Resultados
Experimentales

Contribuciones
y Trabajos
Futuros

- Nuevas heurísticas derivadas de la definición general
- Incorporación de interacciones negativas
 - Orden precondiciones
 - Cambio de representación
- Relación con heurísticas recientes
- Costes dependientes del estado
- Combinaciones algoritmos



Tesis Doctoral

Búsqueda Heurística en Planificación Basada en Costes

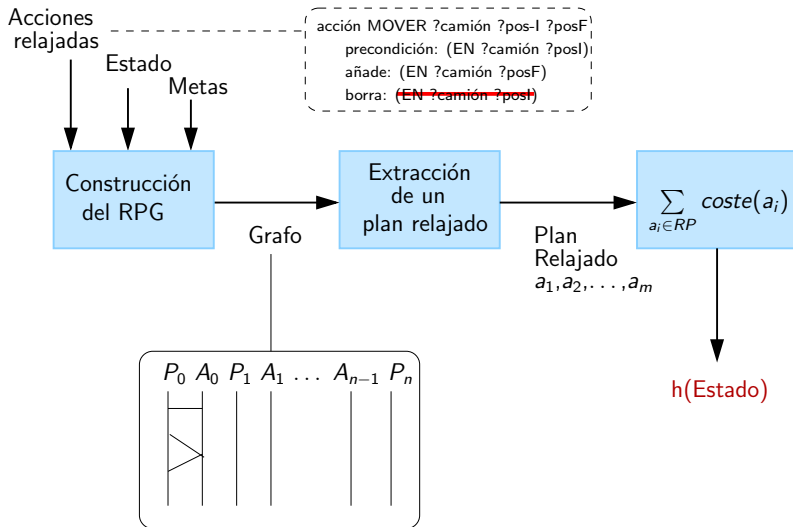
Raquel Fuentetaja Pizán

Universidad Carlos III de Madrid

Directores: Daniel Borrajo Millán y Carlos Linares López



Grafos de Planificación Relajados (RPGs)



Tesis Doctoral

Raquel
Fuentetaja
Pizán

Ecuaciones

$$h(\mathcal{G}, s) = \text{Cost}_h(\pi(\mathcal{G}; s; \text{Agg}_h)) \quad (1)$$

Ecuaciones

$$h(\mathcal{G}, s) = \text{Cost}_h(\pi(\mathcal{G}; s; \text{Agg}_h)) \quad (1)$$

$$\pi(P; s; \text{Agg}) = \begin{cases} \emptyset & \text{if } P \subseteq s \\ \pi(a_P; P; s; \text{Agg}) & \text{if } P \not\subseteq s, |P| \leq m \\ \text{Agg}(\{\pi(P_m; s; \text{Agg})\}) & \text{if } P \not\subseteq s, |P| > m \end{cases} \quad (2)$$

donde P_m representa cualquier subconjunto de P de tamaño m :
 $P_m \subseteq P$ y $|P_m| = m$.

Ecuaciones

$$h(\mathcal{G}, s) = \text{Cost}_h(\pi(\mathcal{G}; s; \text{Agg}_h)) \quad (1)$$

$$\pi(P; s; \text{Agg}) = \begin{cases} \emptyset & \text{if } P \subseteq s \\ \pi(a_P; P; s; \text{Agg}) & \text{if } P \not\subseteq s, |P| \leq m \\ \text{Agg}(\{\pi(P_m; s; \text{Agg})\}) & \text{if } P \not\subseteq s, |P| > m \end{cases} \quad (2)$$

donde P_m representa cualquier subconjunto de P de tamaño m :
 $P_m \subseteq P$ y $|P_m| = m$.

$$\pi(a; P; s; \text{Agg}) = \left\{ \bigcup_{p \in \text{add}(a) \cap P} \{((a, p), 1)\} \right\} \bigcup \pi(\text{Reg}(P, a); s; \text{Agg}) \quad (3)$$

donde $\text{Reg}(P, a) = P \setminus \text{add}(a) \cup \text{pre}(a)$

Ecuaciones

Raquel
Fuentetaja
Pizán

$$h(\mathcal{G}, s) = \text{Cost}_h(\pi(\mathcal{G}; s; \text{Agg}_h)) \quad (1)$$

$$\pi(P; s; \text{Agg}) = \begin{cases} \emptyset & \text{if } P \subseteq s \\ \pi(a_P; P; s; \text{Agg}) & \text{if } P \not\subseteq s, |P| \leq m \\ \text{Agg}(\{\pi(P_m; s; \text{Agg})\}) & \text{if } P \not\subseteq s, |P| > m \end{cases} \quad (2)$$

donde P_m representa cualquier subconjunto de P de tamaño m :
 $P_m \subseteq P$ y $|P_m| = m$.

$$\pi(a; P; s; \text{Agg}) = \left\{ \bigcup_{p \in \text{add}(a) \cap P} \{((a, p), 1)\} \right\} \bigcup \pi(\text{Reg}(P, a); s; \text{Agg}) \quad (3)$$

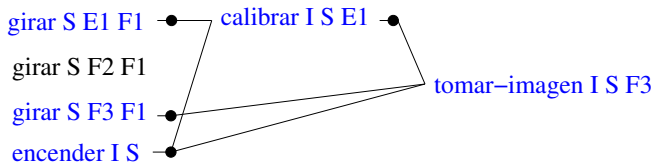
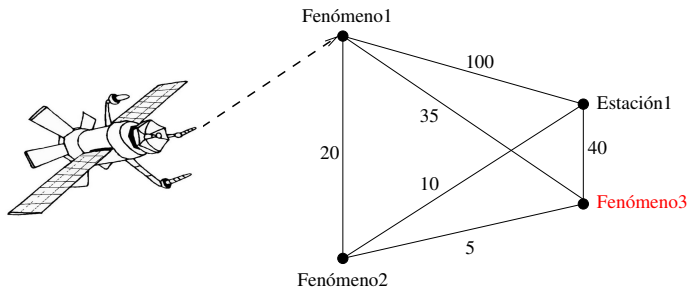
donde $\text{Reg}(P, a) = P \setminus \text{add}(a) \cup \text{pre}(a)$

$$a_P \in \arg \min_{a \in A(P)} \text{Cost}_{a_P}(\pi(a; P; s; \text{Agg}_{a_P})) \quad (4)$$

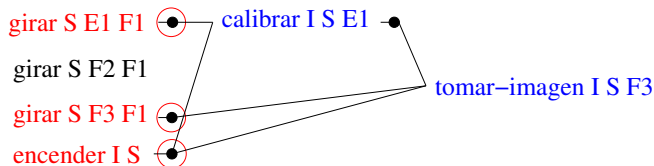
donde $A(P) = \{a \in \mathcal{A} \mid \text{add}(a) \cap P \neq \emptyset \wedge \text{del}(a) \cap P = \emptyset\}$

Acciones útiles

Raquel
Fuentetaja
Pizán



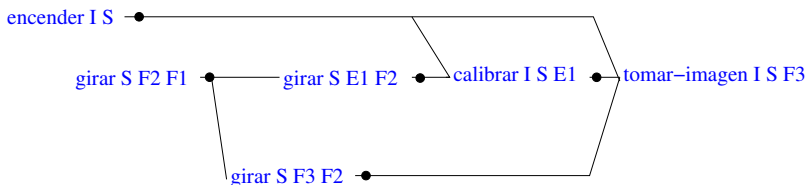
Acciones útiles



Acciones **aplicables** que generan submetas

- 1 De nivel 1
- 2 Generadas por acciones seleccionadas
- 3 Generadas por acciones aplicables seleccionadas

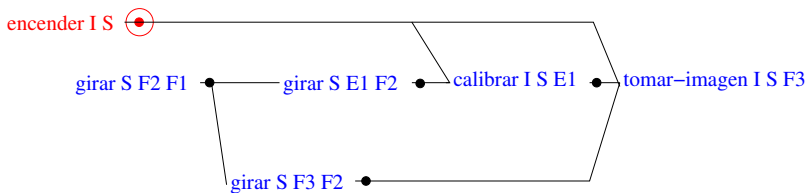
Acciones útiles: h_{level}



Acciones **aplicables** que generan submetas

- ① De nivel 1
- ② Generadas por acciones seleccionadas
- ③ Generadas por acciones aplicables seleccionadas

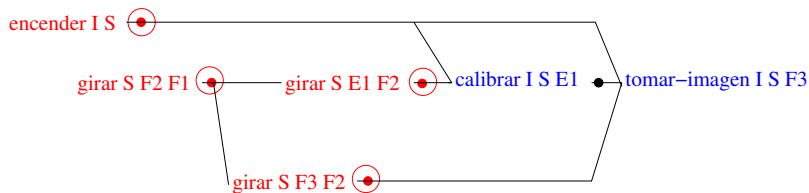
Acciones útiles: h_{level}



Acciones aplicables que generan submetas

- 1 De nivel 1
- 2 Generadas por acciones seleccionadas
- 3 Generadas por acciones aplicables seleccionadas

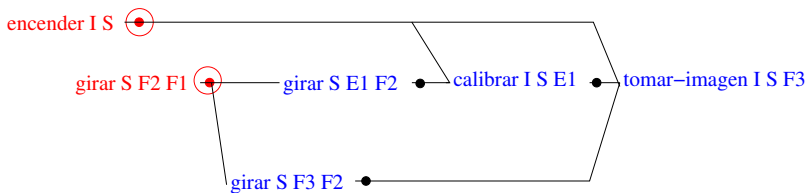
Acciones útiles: h_{level}



Acciones aplicables que generan submetas

- 1 De nivel 1
- 2 Generadas por acciones seleccionadas
- 3 Generadas por acciones aplicables seleccionadas

Acciones útiles: h_{level}



Acciones aplicables que generan submetas

- 1 De nivel 1
- 2 Generadas por acciones seleccionadas
- 3 Generadas por acciones aplicables seleccionadas