- **Tema 3: Representación del conocimiento e inferencia**
  - 3.2: Lógica y Prolog – Índice de contenidos
    - Lógica de predicados
      - Sintaxis, semántica, propiedades
      - ¿Cómo usar la lógica para representar conocimiento?
      - Mecanismos de inferencia: deducción, resolución
      - Problemas de la representación con LPO
    - Representación de conocimiento con Prolog
      - Conceptos básicos
      - Representación de conocimiento factual con Prolog
      - Consultas, backtracking, negación, reglas
      - Relaciones transitivas
      - Herencia de propiedades
      - Relaciones simétricas
      - Listas

Técnicas de representación y razonamiento

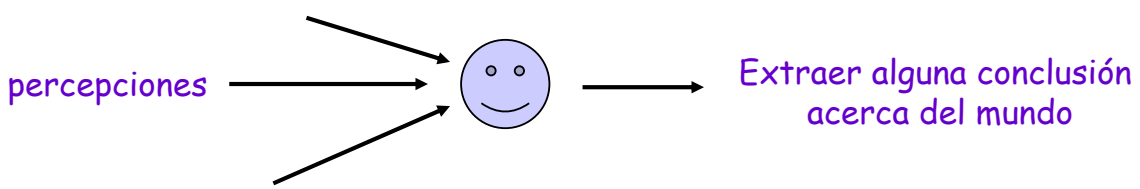
- Técnicas de representación del conocimiento
  - Representaciones básicas
    - Lógica de predicados. Representación en Prolog
    - Redes semánticas
    - Sistemas de producción
  - Representaciones estructuradas
    - Marcos (frames) y guiones (scripts)
  - Estudio comparativo de las técnicas de representación
  - Lenguajes de representación del conocimiento

Técnicas de representación y razonamiento

- Diversos formalismos para construir bases de conocimiento
  - Representaciones basadas en relaciones
    - Lógica
    - Redes semánticas
  - Representaciones basadas en objetos
    - Marcos
    - Objeto-Atributo-Valor
  - Representaciones basadas en acciones
    - Sistemas de producción
    - Guiones
  - Combinaciones y modificaciones de los anteriores

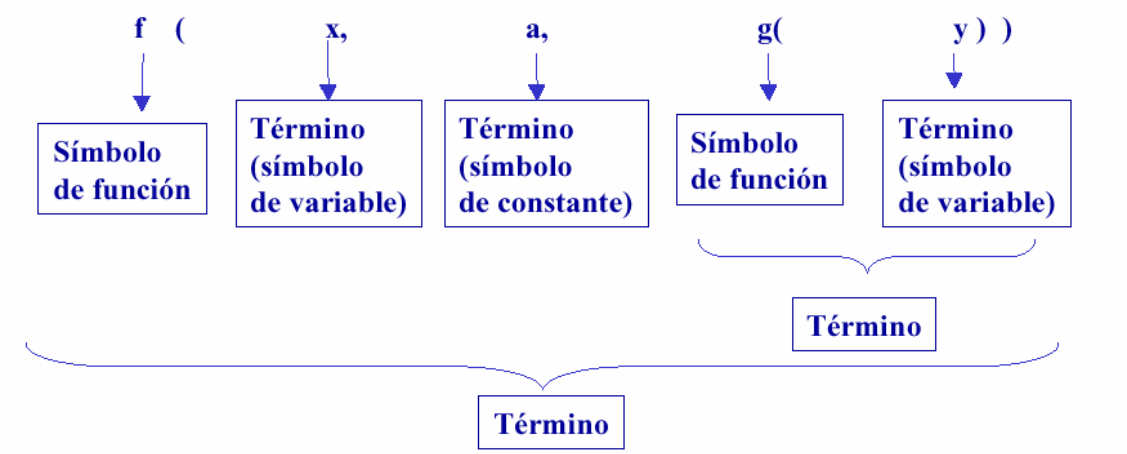
¿Qué es una lógica?

- Una lógica es un lenguaje formal
  - Tiene una sintaxis que determina qué expresiones son legales *(la forma)*
  - También cuenta con una semántica que determina qué representan las expresiones legales *(el contenido)*
  - Y suele disponer de un sistema de inferencia que permite manipular expresiones sintácticas para obtener otras expresiones sintácticas
    - ¿Con qué propósito?
      - Obtener expresiones con un significado "interesante"
      - Que nos digan algo "nuevo" del mundo



Lógica de predicados: sintaxis

- Términos
  - Un símbolo de constante es un término *(a, b, c...)*
  - Un símbolo de variable es un término *(x, y, z...)*
  - Si *f* es un símbolo de función (o functor) de aridad *n*, y *t1, t2, ..., tn* son términos, entonces *f(t1, t2, ..., tn)* es un término compuesto
- Ejemplo: *f (x, a, g(y))*



Lógica de predicados: sintaxis

- Fórmulas

ATÓMICAS

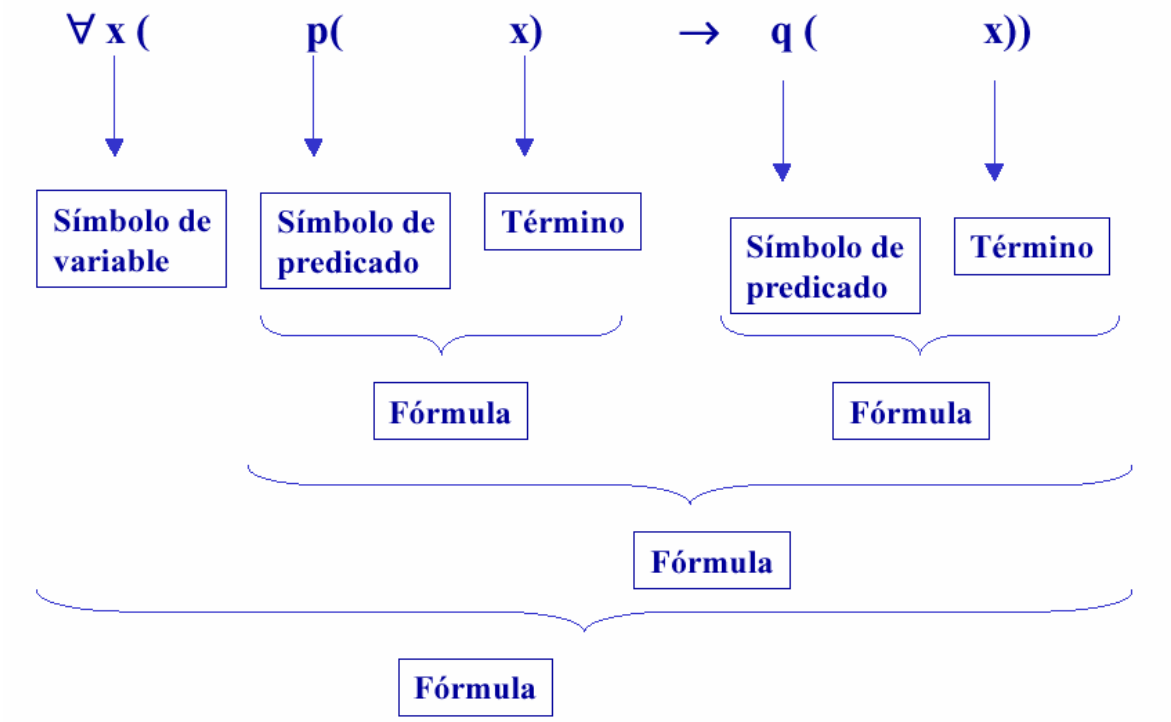
- Los símbolos de verdad T y el de falsedad o contradicción ⊥ son fórmulas
- Si *p* es un símbolo de predicado de aridad *n*, y *t1, t2, ..., tn* son términos, entonces *p(t1, t2, ..., tn)* es una fórmula

COMPUESTAS

- Si *F* es una fórmula, entonces $\neg F$ es una fórmula
- Si *F* y *G* son fórmulas, entonces:
  - $(F \wedge G)$ es una fórmula
  - $(F \vee G)$ es una fórmula
  - $(F \rightarrow G)$ es una fórmula
  - $(F \leftrightarrow G)$ es una fórmula
- Si *x* es un símbolo de variable, y *F* es una fórmula, entonces:
  - $\forall x\ F$ es una fórmula
  - $\exists x\ F$ es una fórmula

Lógica de predicados: sintaxis

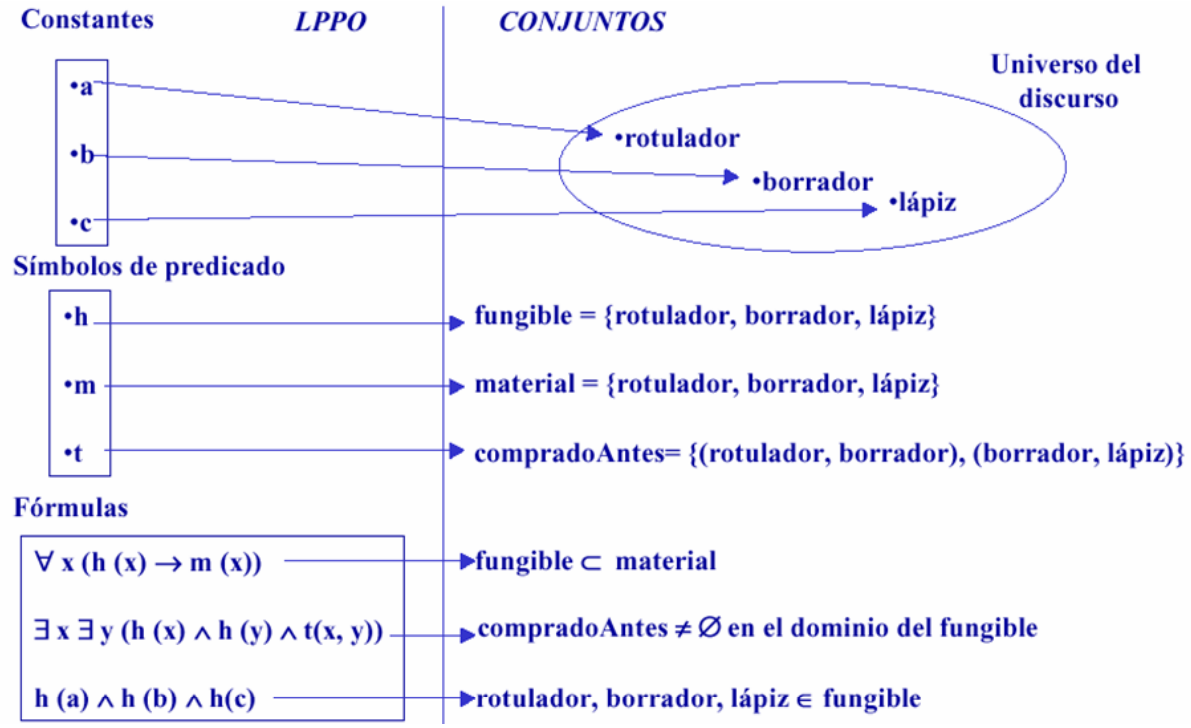
- Ejemplo de fórmula: $\forall x\ (p(x) \rightarrow q(x))$



Lógica de predicados: semántica

- Los significados de términos y fórmulas se obtienen fijando una interpretación *I* que consta de
  - Un conjunto llamado *U* universo (o dominio) de discurso
  - Una asociación de elementos de *U* a los símbolos de constante
  - Una asociación de relaciones en *U* a los símbolos de predicado
  - Una asociación de funciones en *U* a los símbolos de función

Lógica de predicados: semántica



Lógica de predicados: propiedades

- Representación declarativa
  - No está fijada la forma en la que debe ser usado el conocimiento
    - Sencillez para incorporar nuevo conocimiento, o eliminarlo
    - Sencillez de integración de dos o más BCs
- Corrección y completitud
  - Cuenta con mecanismos deductivos correctos y completos
    - Permiten deducir nuevo conocimiento (conclusiones) a partir del conocimiento de partida (premisas)
    - Pueden usarse para responder a preguntas o resolver problemas
      - Demostración automática de teoremas: una de las áreas iniciales de la IA
- La deducción es semi-decidible en LPO
  - Si lo que pretendemos demostrar no se deduce del contenido de la base de conocimiento, no está garantizado que termine el proceso de demostración
    - No existe un procedimiento de decisión, ni siquiera de coste exponencial

Dificultades en la representación

- Lenguaje natural → lógica de predicados
  - Ambigüedad, sentido común, implicaciones y disyunciones...
- Incompletitud del conocimiento representado
  - Es imposible representar TODO el conocimiento
  - Representamos sólo lo más importante
  - No incluimos conocimiento de "sentido común"
    → habrá razonamientos que no podrán hacerse
- Infinidad de alternativas de representación dentro de la lógica
  - Influyen en el proceso de razonamiento. Algunas representaciones facilitan un tipo de razonamiento y dificultan otro
  - Lo importante es usar una representación consistente dentro de la misma BC
- Dificultades en la representación del conocimiento por defecto
  - Por ejemplo, las excepciones a la herencia

Alternativas de representación

- Ejemplo
  - Representación de conocimiento factual terminológico
    - Relaciones de ejemplar ($\in$) y subclase ($\subseteq$)
    - Propiedades esenciales
- Discutiremos distintas alternativas de representación, señalando sus ventajas y sus inconvenientes
  - "Flipper es un delfín" — *ejemplar de una clase*
  - "Todos los delfines son vertebrados" — *relación de subclase*
  - "Los vertebrados tienen esqueleto" — *propiedad esencial*
- En cualquier formalismo, hay muchas maneras de representar el conocimiento
  - La elección depende en parte de qué deducciones han de poderse hacer eficientemente (y en parte de los gustos de cada cual)
  - Lo importante es que la representación sea consistente

Alternativas de representación

- Versión 1
  - Representación implícita de ejemplares: el nombre de la clase es un símbolo de predicado unario, el argumento es el ejemplar

    Delfín(flipper)
  - Representación de la subclase *delfín* de la clase *vertebrados*

    ∀x (Delfín(x) → Vertebrado(x))
  - Representación de propiedades esenciales

    ∀x (Vertebrado(x) → Tiene-Esqueleto(x))
  - Ventajas
    - Sencillez de la representación
  - Desventajas
    - Para cualquier clase (Delfín, Elefante...) habrá que crear predicados y reglas (subclases) específicas
    - Se complica el razonamiento general
    - El conocimiento implícito se deduce a través de las implicaciones. Es mejor afirmar las cosas explícitamente por medio de hechos

Alternativas de representación

- Versión 2
  - Representación explícita de la pertenencia de ejemplares a clases: se utiliza un símbolo de predicado binario Es_Un(ejemplar, Clase)

    Es_Un(flipper, Delfín)
  - Representación de la subclase *delfín* de la clase *vertebrados*

    ∀x (Es_Un(x, Delfín) → Es_Un(x, Vertebrado))
  - Representación de propiedades esenciales

    ∀x (Es_Un(x, Vertebrado) → Tiene_Esqueleto(x))
  - Ventajas
    - Representación explícita de la pertenencia de ejemplares a clases
  - Desventajas
    - La relación de subclase sigue siendo implícita

Alternativas de representación

- Versión 3
  - Representación explícita de ejemplares y subclases utilizando un predicado Es_Un

    Es_Un(flipper, Delfín)

    Es_Un(Delfín, Vertebrado)

    ∀x (Es_Un(x, Vertebrado) → Tiene_Esqueleto(x))

  - Ventajas
    - Representación explícita de la pertenencia de ejemplares a clases
    - Representación explícita de la relación subclase
  - Desventajas
    - El sistema no puede diferenciar si *flipper* es individuo o clase
    - No puede deducirse que *Flipper* tenga esqueleto
    - Falta especificar la transitividad de la relación *Es_Un*. Habría que añadirla

    ∀x∀y∀z (Es_Un(x, y) ∧ Es_Un(y, z) → Es_Un (x, z))

Alternativas de representación

- Versión 4
  - Representación explícita de ejemplares y subclases utilizando dos símbolos de predicado binarios distintos

    Ejemplar(flipper, Delfín)

    Subclase(Delfín, Vertebrado)

    ∀x (Ejemplar(x, Vertebrado) → Tiene_Esqueleto(x))

  - Añadimos la transitividad

    ∀x∀y∀z (Ejemplar(x,y) ∧ Subclase(y,z) →

    Ejemplar(x,z))

    ∀x∀y∀z (Subclase(x,y) ∧ Subclase(y,z) →

    Subclase(x,z))

Alternativas de representación

- Las cuatro versiones usan como técnica de representación a la lógica de predicados o lógica de primer orden (LPO)
  - Existen distintas posibilidades de representación dentro de la lógica (en general, esto ocurre con cualquier formalismo)
  - Algunas representaciones facilitan un tipo de razonamiento y dificultan otro

Conocimiento por omisión

- ¿Cómo añadir las excepciones a la herencia de propiedades?

  $\forall x$ (Gorila(x) → Pelo_Oscuro(x))

  Gorila(Copito)

  ¬ Pelo_Oscuro(Copito)

  - ¡Inconsistencia! *(inaceptable en una BC)*
  - No queda más remedio que incluir las excepciones dentro de la definición general

    $\forall x$ (Gorila(x) ∧ ¬ igual(x, Copito) → Pelo_Oscuro(x))

    Gorila(Copito)

- Las excepciones a la herencia son difíciles de representar en LPO
  - En Prolog se simplifica porque no hay que modificar las reglas generales sino que basta con colocar las excepciones delante

Mecanismos de inferencia

- Deducción: obtención de nuevo conocimiento *(implícito)*
- Se trata de saber si una fórmula *Q* es cierta conociendo
  - Los axiomas que son lógicamente válidos sea cual sea el significado de los símbolos *(tautologías)*

    $\neg F \vee F$
  - Los axiomas que son válidos sólo suponiendo ciertos significados de los símbolos *(conocimiento explícito)*
  - Las reglas de inferencia
    - Por ejemplo:

modus ponens

$P \rightarrow Q$
P

Q

modus tolens

$P \rightarrow Q$
$\neg Q$

$\neg P$

Ejemplo de deducción formal

- Dado un conjunto de hipótesis o premisas

  perro(milú)

  ∀x (perro(x) → animal(x))

  ∀y (animal(y) → mortal(y))
- Demostrar una conclusión

  mortal(milú)
- Pasos aplicados
  1. Aplicar instanciación universal con *x* = *milú*

     perro(milú) → animal(milú)
  2. Aplicar modus ponens

     animal(milú)
  3. Aplicar instanciación universal con *y* = *milú*

     animal(milú) → mortal(milú)
  4. Aplicar modus ponens

     mortal(milú)

Cláusulas y resolución

- En la práctica, resulta incómodo operar con un sistema deductivo formal en el que las expresiones lógicas utilizadas tienen formas muy variadas y se debe elegir entre muchas reglas de deducción aplicables en cada paso
- Esta situación se puede mejorar notablemente transformando las fórmulas lógicas a una forma normal más sencilla para operar
  - En particular, la forma de cláusula sólo utiliza las conectivas ¬ y ∨ (negación y disyunción), y necesita una sola regla de deducción

Resolución *[Robinson, 1965]*

$$\begin{array}{rcr} \boldsymbol{P \vee Q} & \sim & \neg P \rightarrow Q \\ \boldsymbol{\neg Q \vee R} & \sim & Q \rightarrow R \\ \hline \boldsymbol{P \vee R} & & \neg P \rightarrow R \end{array}$$

  - Con esta restricción no se pierde generalidad porque existe un algoritmo de conversión a forma normal conjuntiva que permite plantear cualquier problema lógico en forma de cláusulas

Forma clausal: algoritmo de conversión

- Eliminar la conectiva → utilizando la equivalencia lógica

  $(\varphi \rightarrow \psi) \sim (\neg\varphi \vee \psi)$

- Reducir el alcance de cada ¬, para que sólo afecten a fórmulas atómicas, utilizando las equivalencias lógicas

  $\neg\neg\varphi \sim \varphi$ $\quad \neg(\varphi \wedge \psi) \sim (\neg\varphi \vee \neg\psi)$ $\quad \neg(\varphi \vee \psi) \sim (\neg\varphi \wedge \neg\psi)$

  $\neg\exists x\, \varphi \sim \forall x\, \neg\varphi$ $\quad \neg\forall x\, \varphi \sim \exists x\, \varphi$

- Renombrar las variables ligadas por distintos cuantificadores, de manera que todas tengan nombres distintos

  $\exists x\, \varphi \sim \exists y\, \varphi[x/y]$ $\quad \forall x\, \varphi \sim \forall y\, \varphi[x/y]$ $\quad$ *si y no está en lib(φ)*

- Trasladar todos los cuantificadores al principio *(forma normal prenexa)*, sin cambiar su orden relativo, aplicando equivalencias lógicas

  $\exists x\, \varphi \vee \exists x\, \psi \sim \exists x\, (\varphi \vee \psi)$ $\quad \forall x\, \varphi \wedge \forall x\, \psi \sim \forall x\, (\varphi \wedge \psi)$

  $\exists x\, \varphi \vee \psi \sim \exists x\, (\varphi \vee \psi)$ $\quad \exists x\, \varphi \wedge \psi \sim \exists x\, (\varphi \wedge \psi)$ $\quad$ *si x no está en lib(ψ)*

  $\forall x\, \varphi \vee \psi \sim \forall x\, (\varphi \vee \psi)$ $\quad \forall x\, \varphi \wedge \psi \sim \forall x\, (\varphi \wedge \psi)$ $\quad$ *si x no está en lib(ψ)*

Forma clausal

- Eliminar los cuantificadores existenciales mediante *skolemización*, i.e., reemplazar las variables cuantificadas existencialmente por:
  - una constante nueva *c* si el cuantificador existencial asociado no se encuentra dentro del alcance de ningún cuantificador universal
  - un término *nuevo f(x)* si el cuantificador existencial se encuentra dentro del alcance de un cuantificador universal que cuantifique a la variable *x*
  - un término *nuevo g(x, y)* si el cuantificador existencial se encuentra dentro del alcance de cuantificadores universales para *x* e *y*, etcétera.
- Eliminar el prefijo de la fórmula: todos los cuantificadores universales que quedan al principio de la fórmula
- Distribuir $\vee$ sobre $\wedge$ para convertirla en una conjunción de disyunciones *(forma normal conjuntiva)* aplicando la equivalencia

  $(\varphi \vee (\psi \wedge \mu)) \sim ((\varphi \vee \psi) \wedge (\varphi \vee \mu))$
- Cada componente de la conjunción resultante se convierte en una cláusula independiente constituida por una disyunción de literales (fórmulas atómicas negadas o no) *(forma clausal)*

Deducción por refutación

Base de conocimientos: $Q \leftarrow T,\ T \leftarrow S,\ S \leftarrow P,\ P$
Consulta: $Q?$

Paso 1.	Paso 2.	Paso 3.	Paso 4.
$Q \leftarrow T$	$T \leftarrow S$	$S \leftarrow P$	P
$\neg Q$	$\neg T$	$\neg S$	$\neg P$
---	---	---	---
$\neg T$	$\neg S$	$\neg P$	•

Paso 1. Se niega lo que se pretende demostrar

Pasos 1, 2 y 3. Aplicación reiterada de modus tolens

Paso 4. $P \wedge \neg P \sim \bot$ se llega a contradicción

Refutación: razonamiento por reducción al absurdo

$$\Phi \models \psi \Leftrightarrow \text{Insat } \Phi \cup \{\neg\psi\}$$

Deducción por resolución

Ejemplo: ¿a?

	Forma clausal
$b \wedge c \rightarrow a$	$a \vee \neg b \vee \neg c$
$d \rightarrow c$	$c \vee \neg d$
b	b
d	d

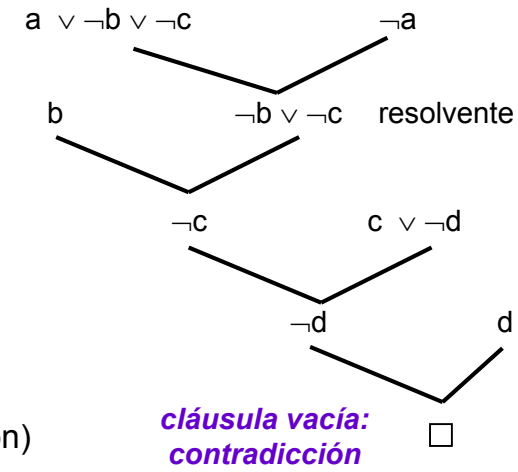
Añadir la negación de lo que queremos demostrar: **¬a**
y probar que llegamos a una contradicción *(conjunto insatisfactible)*

Resolución

$\varphi \vee Q$ ***un literal positivo en una cláusula***

$\neg Q \vee \psi$ ***y el mismo negativo en otra***

$\varphi \vee \psi$ ***resolvente***



cláusula vacía: contradicción □

Proposiciones → Predicados
(Resolución con unificación)

Resolución con unificación

$a(3) \vee b(y) \vee \neg c(z, y)$ $\qquad$ $\neg a(w) \vee b(\text{'juan'}) \vee c(w, \text{'miguel'})$

$w / 3$

$b(y) \vee \neg (c(z, y)) \vee c(3, \text{'miguel'})$

U.m.g.: unificador más general posible de los literales candidatos
Se aplica a las cláusulas padres antes de calcular el resolvente
Deben considerarse variantes de las cláusulas (variables frescas)

$a(3) \vee b(y) \vee \neg c(z, y)$ $\qquad$ $\neg a(w) \vee b(\text{'juan'}) \vee c(w, \text{'miguel'})$

$y / \text{'miguel'}$
z / w

$a(3) \vee b(\text{'miguel'}) \vee \neg a(w) \vee b(\text{'juan'})$

Se selecciona un único par de literales complementarios

Estrategias de resolución

- No es fácil determinar en cada paso qué cláusulas resolver y con qué literales *(grado de no determinismo muy alto)*
  - Si la elección se realiza de forma sistemática, la resolución llegará a contradicción si el conjunto de cláusulas es insatisfactible
  - Así es completa, pero puede requerir mucho tiempo...
- Se utilizan diversas estrategias para acelerar el proceso
  - Indexar las cláusulas por los predicados que contienen, indicando si están o no negados, para facilitar su localización
  - Eliminar tautologías *($\varphi \vee \neg \varphi$)* y cláusulas que son *subsumidas* por otras (son implicadas por otras: $\varphi \vee \psi$ es subsumida por φ)
  - Intentar resolver con una de las cláusulas de la fórmula que estamos intentando refutar, o con alguna cláusula que se haya obtenido por resolución a partir de una de ellas
    (intuición: la contradicción tiene que salir de ahí)
  - Resolver con cláusulas que tengan un solo literal
    (idea: disminuye el tamaño de las cláusulas generadas)

Contestar a preguntas

- ¿Tiene esqueleto *flipper*?
  - Hay dos opciones para saber si algo se deduce o no de la BC

  1) Demostrar **Tiene_esqueleto(flipper)**

     ➔ añadir **¬Tiene_esqueleto(flipper)**

  2) Demostrar **¬Tiene_esqueleto(flipper)**

     ➔ añadir **Tiene_esqueleto(flipper)**

  - La opción correcta depende de cómo son los predicados de la BC

    Ejemplar(flipper, Delfín)

    Subclase(Delfín, Vertebrado)

    $\forall x$ (Ejemplar(x, Vertebrado) ➔ Tiene_Esqueleto(x))

    $\forall x \forall y \forall z$ (Ejemplar(x,y) $\wedge$ Subclase(y,z) ➔ Ejemplar(x,z))

    $\forall x \forall y \forall z$ (Subclase(x,y) $\wedge$ Subclase(y,z) ➔ Subclase(x,z))

Contestar a preguntas

- ¿Existe algún delfín?
  - Demostrar **∃x Ejemplar(x, Delfín)**
    - ➔ añadir **¬∃x Ejemplar(x, Delfín)** en forma clausal
    - ➔ **~ ∀x ¬Ejemplar(x, Delfín)** en forma clausal
    - ➔ añadir **¬Ejemplar(t, Delfín)** variante
  - Cómo preguntar depende de cómo son los predicados de la BC

    Ejemplar(flipper, Delfín)

    Subclase(Delfín, Vertebrado)

    ∀x (Ejemplar(x, Vertebrado) → Tiene_Esqueleto(x))

    ∀x∀y∀z (Ejemplar(x,y) ∧ Subclase(y,z) →
    Ejemplar(x,z))

    ∀x∀y∀z (Subclase(x,y) ∧ Subclase(y,z) →
    Subclase(x,z))
  - Si se requiere usar unificación, la resolución devolverá los valores que hacen cierta la pregunta: **{t = flipper}**

Problemas de la representación con LPO

- La resolución no es la forma en que una persona piensa
  - No es válida en sistemas de enseñanza o de diagnóstico médico en los que el sistema debe explicar su razonamiento
  - Proceso de búsqueda no guiado por el razonamiento humano
    - La resolución, con la transformación a forma clausal, no es lo más indicado para que una persona interactúe con la máquina, para ayudar
- Demostración por búsqueda ➔ problemas de eficiencia
  - Necesidad de heurísticas, indexación de la base de conocimiento
  - BC plana: todas las cláusulas tienen la misma importancia
    → añadir meta-conocimiento para dirigir las búsquedas
    - No organizable, imposibilidad de priorizar: explosión combinatoria
- Es difícil representar los distintos tipos de conocimiento
  - Excepciones como cláusulas
  - Conocimiento impreciso ➔ ampliación con otros cuantificadores
  - Conocimiento heurístico ➔ difícil de representar

- **Tema 3: Representación del conocimiento e inferencia**
  - 3.2: Lógica y Prolog – Índice de contenidos
    - Lógica de predicados
      - Sintaxis, semántica, propiedades
      - ¿Cómo usar la lógica para representar conocimiento?
      - Mecanismos de inferencia: deducción, resolución
      - Problemas de la representación con LPO
    - Representación de conocimiento con Prolog
      - Conceptos básicos
      - Representación de conocimiento factual con Prolog
      - Consultas, backtracking, negación, reglas
      - Relaciones transitivas
      - Herencia de propiedades
      - Relaciones simétricas
      - Listas

Representación de conocimiento con Prolog

- Conceptos básicos
  - Término, variable, constante, átomo, estructura
- Representación de conocimiento factual
- Consultas, backtracking, negación
- Reglas
- Relaciones transitivas
- Herencia de propiedades
- Relaciones simétricas
- Listas

- Se complementa con los ejercicios propuestos en la hoja 3

Prolog

- Sistema de Programación Lógica
  - Conjunto de fórmulas = programa
- Representación del conocimiento a medio camino entre
  - Una representación declarativa
    - La lógica de predicados o de primer orden
    - Prolog no es declarativo puro porque tiene fijado el mecanismo de inferencia, aparte de por otras cuestiones
  - Una representación procedimental
    - Se clasifica más dentro de los sistemas de producción

Representación declarativa vs. procedimental

- Representación declarativa
  - Representamos el conocimiento pero no la forma de utilizarlo
  - Una representación declarativa debe acompañarse con algún programa que especifique qué hacer con el conocimiento y cómo
    - Por ejemplo, fórmulas lógicas + deducción o resolución
- Representación procedimental
  - Otro punto de vista: un conjunto de fórmulas lógicas puede verse en lugar de como un conjunto de datos que se le suministra a un programa, como un programa por sí mismas
  - Las implicaciones establecen la forma de razonar (los caminos legítimos para hacerlo) y las fórmulas atómicas nos dan los puntos de partida, razonando hacia delante, o, si razonamos hacia atrás, los puntos de llegada de esos caminos
  - La información de control para usar el conocimiento forma parte de la propia representación del conocimiento

Representación declarativa vs. procedimental

- No determinismo
  - Si hay varias alternativas, como un programa necesita tener determinada una forma de proceder, el intérprete tendrá que tener fijada una estrategia concreta para realizar estas elecciones
  - Por ejemplo, se pueden examinar las fórmulas en el orden textual en el que aparecen en el programa y la búsqueda puede hacerse primero en profundidad
  - Esta estrategia forma parte del sistema y es lo que lo convierte en procedimental
  - Un punto de vista declarativo consideraría todas las alternativas
- Mucha controversia en IA sobre qué tipo de representación es mejor
  - Estudiaremos cómo distintos formalismos basados en reglas e intérpretes pueden combinarse para resolver problemas

Prolog

- Conocimiento expresable sólo como cláusulas de Horn *(Prolog puro; la parte impura de Prolog se desvía)*
  - Subconjunto decidible de la LPO
  - Básicamente se trata de cláusulas que tienen como mucho un literal positivo
    - Restricción que lleva a una representación uniforme del conocimiento
    - Esto posibilita la implementación de un intérprete sencillo y eficiente
- Razonamiento hacia atrás *(a partir de un objetivo)*
- Exploración de la BC en orden prefijado *(de arriba a abajo)*
- Búsqueda primero en profundidad con *backtracking*
  - Resolución SLD (estrategia de resolución fija)
    - *Selecting a literal, using a linear strategy, restricted to definite clauses*
  - En profundidad y el subobjetivo más a la izquierda
- Principal ventaja e inconveniente: estrategia de control fija

Prolog: conceptos básicos

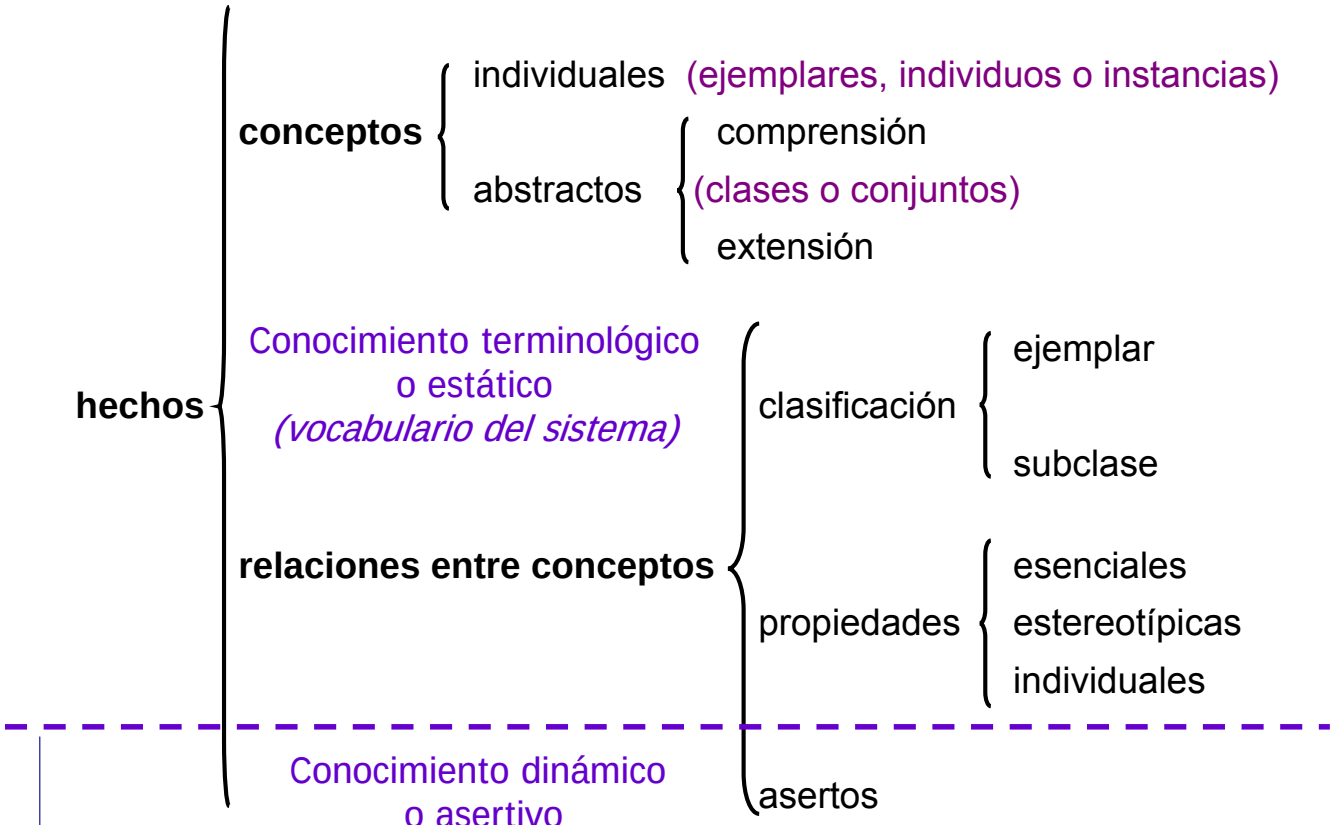
- Término: constante, variable o estructura *(compuestos)*
  - Término cerrado: término que no contiene variables
- Variable: secuencia de caracteres *(letras, números y _)* que empieza por letra mayúscula o por _ *(A, Algo, _algo, _)*
- Constante: número *(3, -3, 3.14, 2.8e+20)* o átomo
  - Átomo: cualquier secuencia de caracteres *(letras, números y _)* que empiece por letra minúscula o aparezca entre comillas simples
- Estructura: functor seguido de uno o más términos, denominados argumentos, entre paréntesis y separados por comas *(c(t1, t2, ..., tn))*
  - Cada functor se caracteriza por su nombre, que es un átomo, y su aridad *(nº de argumentos)*
    - Dos functores con el mismo nombre y distinta aridad se consideran distintos
    - Un functor *f* de aridad *n* se representa como *f/n*

Representación con Prolog

- La representación en Prolog se basa en la formalización en cláusulas de Horn
  - Una cláusula es una disyunción de cualquier número de literales (fórmulas atómicas afirmadas o negadas)
  - Las cláusulas de Horn se caracterizan por tener un solo literal positivo y cualquier número de literales negativos
  - Por ejemplo: P, $Q \vee \neg P$, $R \vee \neg P \vee \neg Q$
  - No todas las fórmulas se pueden transformar en cláusulas de Horn
  - Constituyen un subconjunto decidible de la LPO
- Las cláusulas anteriores se escriben en Prolog como

Cláusulas de Horn	Fórmulas equivalentes	Representación en Prolog
P	P	p.
$Q \vee \neg P$	$P \rightarrow Q$	q :- p.
$R \vee \neg P \vee \neg Q$	$P \wedge Q \rightarrow R$	r :- p, q.

Conocimiento factual: recordatorio



Representación de conocimiento factual

- Fijamos convenios para la representación de los hechos en Prolog
  - Conceptos (individuales o abstractos) ➔ átomos
    - Argumentos o nombres de functores
  - Relaciones entre conceptos ➔ predicados ➔ estructuras *(términos compuestos)*
  - Los predicados pueden tener muchos significados. Por ello, clasificamos a algunos de ellos en categorías de predicados
    - Predicados de tipo
    - Predicados de propiedad
    - Predicados de relación
    - Predicados de aridad superior a 2
      - Predicados registro
      - Predicados función
      - Predicados con grado de certeza

Representación de conocimiento factual

- Predicados de tipo: clase *(concepto abstracto)* a la que pertenece un ejemplar *(concepto individual)*

delfín(flipper).
vertebrado(delfín).
vehículo(automóvil).
vehículo(motocicleta).
objeto_físico(automóvil).

tipo(concepto).

- Predicados de propiedad: valor de una propiedad de un concepto

color(flipper, gris).
color(aluminio, gris).
fecha_nacimiento(juan, 1980).

propiedad(concepto, valor).

Representación de conocimiento factual

- Predicados de relación: relación entre dos conceptos
  - Al interpretar su significado utilizamos el convenio infijo

relación(concepto1, concepto2).

es_parte_de(motor, coche).
es_padre_de(juan, luis).
es_un(flipper, delfín).
es_un(delfín, vertebrado).
ejemplar(flipper, delfín).
subclase(delfín, vertebrado).

Relaciones de clasificación

Representación de conocimiento factual

- Predicados registro

  datos_libro('El Quijote','Cervantes',1605,'Madrid').

- Predicados función

  2 o más argumentos
  resultado: último argumento

  suma(3, 4, 7).
  jefe_común(juan, maría, maite, luis).

- Predicados con grado de certeza:
  variantes de todos los anteriores para hechos con grado de certeza

  grado de certeza: último argumento

  color(gorila, oscuro, 95).

Ejemplos de objetivos o consultas

- Consultas sin variables

  ?- ejemplar(flipper, delfín).
  yes % éxito: se infiere de la BC

  ?- ejemplar(flipper, animal).
  no % hipótesis del mundo cerrado:
  % ¿falso o BC incompleta?

- Consultas con variables

  ?- ejemplar(flipper, X).
  X=delfín

  ?- ejemplar(X, delfín).
  X=flipper

Base de conocimiento:
es_parte_de(motor, coche).
es_padre_de(juan, luis).
es_un(flipper, delfín).
es_un(delfín, vertebrado).
ejemplar(flipper, delfín).
subclase(delfín, vertebrado).

Ejemplos de objetivos o consultas

- Hechos conocidos por el sistema *(la BC es el programa cargado)*

```
ejemplar(flipper, delfín).
subclase(delfín, vertebrado).
color(delfín, gris).
ejemplar(juan, persona).
ejemplar(maría, persona).
```

- Consultas con varias respuestas *(forzar fallo: backtracking)*

```
?- ejemplar(X, persona).
X=juan ;
X=maría ;
no
```

Forzamos la vuelta a atrás, solicitando más soluciones con ;

Ejemplos de objetivos o consultas

- Consultas con varias variables
  - Las respuestas siguen el orden textual de la BC

```
?-ejemplar(X, Y).
X=flipper, Y=delfín ;
X=juan, Y=persona ;
X=maría, Y=persona ;
no
```

Base de conocimiento:

```
ejemplar(flipper, delfín).
subclase(delfín, vertebrado).
color(delfín, gris).
ejemplar(juan, persona).
ejemplar(maría, persona).
```

Ejemplos de objetivos o consultas

- Consultas compuestas
  - Consultas conjuntivas *(operador conjunción: ',')*

?- ejemplar(flipper, X) , color(X, C).

X=delfín, C=gris

  - Consultas disyuntivas *(operador disyunción: ';')*

?- ejemplar(flipper, X) ;
(ejemplar(flipper,X) , subclase(X, Y)).

X=delfin, Y=_2 ;

X=delfin, Y=vertebrado

Base de conocimiento:
ejemplar(flipper, delfín).
subclase(delfín, vertebrado).
color(delfín, gris).
ejemplar(juan, persona).
ejemplar(maría, persona).

Ejemplo de backtracking (vuelta atrás)

Base de conocimiento:
jefe(luis, marcos).
jefe(jaime, luis).
jefe(marta, ana).
jefe(ana, marcos).

- Jefazos

?- jefe(X,Y), jefe(Y,Z).

X=luis, Y=marcos

No hay ligadura para Z ➔ *backtracking automático*

X=jaime, Y=luis,

Z=marcos ; solicitamos más respuestas con ; (*bactracking forzado*)

No hay más ligaduras para Z ➔ *backtracking automático*

X=marta, Y=ana,

Z=marcos ;

X=ana Y=marcos

No hay ligadura para Z ➔ *backtracking automático* ➔ Fin

no

Negación

- La negación lógica no puede representarse explícitamente en Prolog puro
  - Queda representada implícitamente por ausencia *(hipótesis del mundo cerrado)*
    - Como no podemos incluir explícitamente lo que no se cumple, directamente no se incluye en el programa

      ?- ejemplar(flipper, perro).

      no

      Como Prolog no es capaz de deducirlo, contesta que no es cierto

    - Con esta consulta ocurría lo mismo, pero era debido a que la BC era incompleta, y no a que fuera falso

      ?- ejemplar(flipper, animal).

      no
- Esto nos lleva a la estrategia de la negación por fallo

Negación

- Predicado predefinido \+ *(not/1)*
  - Negación por fallo finito *(no es la negación lógica)*
- El intérprete intenta demostrar el predicado que aparece negado
  - Si tiene éxito, la negación falla
  - Si falla *(falso o BC incompleta)*, la negación tiene éxito
  - Si no termina, la negación tampoco
  - Sólo es lógicamente correcta (es decir, funciona como se pretende) si el argumento de \+ es un término cerrado

    ?- \+(color(delfin, azul)).

    yes
  - Cuando se usan variables, no se producen ligaduras de éstas

Definición de \+:

\+(P) :- P, !, fail.

\+(P).

No es Prolog puro:
- corte rojo
- lectura no declarativa

Negación

Base de conocimiento:
ejemplar(flipper, delfín).
subclase(delfín, vertebrado).
color(delfín, gris).
ejemplar(juan, persona).
ejemplar(maría, persona).

+

Añadimos:
ejemplar(clipper, delfín).
color(clipper, azul).

- Por ejemplo, ¿existe algún delfín que no sea gris?

  ?- \+(color(X, gris)), ejemplar(X, delfín).

  no

  ya que existe algún *X (delfín)* que satisface *color(X, gris)*, la negación falla sin que se compruebe si ese *X* es un ejemplar de la clase *delfín*

El orden de los objetivos es muy importante al usar \+

Negación

Base de conocimiento:
ejemplar(flipper, delfín).
subclase(delfín, vertebrado).
color(delfín, gris).
ejemplar(juan, persona).
ejemplar(maría, persona).

+

Añadimos:
ejemplar(clipper, delfín).
color(clipper, azul).

- Y, sin embargo, si intercambiamos el orden de los objetivos

  ?- ejemplar(X, delfin), \+(color(X, gris)).

  ☺ **X=flipper ;**

  X=clipper ;

  no

El orden de los objetivos es muy importante al usar \+
variables instanciadas en \+ (términos cerrados al ejecutarse \+)

Reglas

- Las reglas constituyen una forma de modularizar conocimiento similar a las subrutinas en otros lenguajes

- Una regla Prolog consta de una parte izquierda y de una parte derecha separadas por el operador **:-**

  A :- B1, …, Bn. **(n > 0)**

  - La parte izquierda (conclusión o cabeza de la regla) describe lo que se está definiendo. Es un término
  - La parte derecha (antecedente, premisas o cuerpo de la regla) describe la conjunción de objetivos que ha de satisfacerse para que la cabeza sea cierta

- Un hecho Prolog también puede escribirse en forma de regla

  A :- true. **(n = 0, conjunción vacía)**

  - No tiene condiciones o premisas. Suele abreviarse como

    A.

Reglas: doble lectura

A :- B11, ..., B1n_1.

... **condiciones suficientes para A**

A :- Bm1, ..., B1n_m.

- Las cláusulas que definen a un predicado suelen admitir una doble lectura
  - Declarativa o lógica: como conjunto de fórmulas

    B11 $\wedge$ ... $\wedge$ B1n_1 $\rightarrow$ A

    ... **el orden es indiferente**

    Bm1 $\wedge$ ... $\wedge$ B1n_m $\rightarrow$ A

  - Procedimental *(Kowalski)* **el orden es importante**

    Para demostrar que **A** se cumple hemos de comprobar
    primero si se cumple **B11**, ..., y, si es así, si se cumple **B1n_1**
    o ...
    o si se cumple **Bm1**, ..., y , si es así, si se cumple **B1n_m**

- Si usamos la parte impura, nos cargamos la lectura declarativa

Reglas

- Al intentar demostrar un objetivo, el intérprete Prolog busca la primera cláusula cuya cabeza unifique con él y lo sustituye por el cuerpo de la regla (afectado por el unificador) e intenta demostrar de izquierda a derecha los objetivos que contiene
  - A su vez, estos objetivos pueden ser cabezas de otras reglas, generando toda una jerarquía de llamadas a reglas
- Si en el cuerpo de la regla aparece la propia cabeza de esa regla, la regla es recursiva

  color(X, C) :- es_parte_de(X, Y), color(Y, C).
- Las variables que figuran como parámetros en la cabeza de la regla están cuantificadas universalmente
- Las variables que sólo figuran en el cuerpo de la regla son variables locales cuantificadas existencialmente y sus vínculos no formarán parte de la respuesta del intérprete

  $\forall X \forall C(\exists Y(es\_parte\_de(X,Y) \wedge color(Y,C)) \rightarrow color(X,C))$

Reglas: legibilidad

- Cuando la parte derecha de una regla es una disyunción

  progenitor(X, Y) :- (padre(X, Y) ; madre(X, Y)).

  se recomienda dividirla en dos reglas distintas para favorecer la legibilidad

  progenitor(X, Y) :- padre(X, Y).

  progenitor(X, Y) :- madre(X, Y).

  Cada una de ellas expresa una condición suficiente, pero no necesaria, para que sea cierto el objetivo *progenitor(X, Y)*

Orden de las cláusulas en la BC

- El orden en el que se colocan las cláusulas que definen a un predicado y el orden en el que se colocan los subobjetivos en el cuerpo de una regla pueden afectar
  - A la solución encontrada
  - A la eficiencia del proceso de búsqueda
  - Y a la terminación de dicho proceso
- Se recomienda poner en primer lugar los hechos y, a continuación, las reglas empezando por las más simples
  - Consideramos que son más simples las que no generan llamadas a otros predicados o las que menos llamadas generan
- En el cuerpo de una regla se recomienda colocar primero los objetivos más difíciles de satisfacer
  - Como los objetivos se evalúan de izquierda a derecha, estaremos disminuyendo el factor de ramificación en los primeros niveles del árbol de búsqueda, aumentando la eficiencia de la búsqueda

Representación de conocimiento con Prolog

- Conceptos básicos
  - Término, variable, constante, átomo, estructura
- Representación de conocimiento factual
- Consultas, backtracking, negación
- Reglas
- Relaciones transitivas
- Herencia de propiedades
- Relaciones simétricas
- Listas

- Se complementa con los ejercicios propuestos en la hoja 3

Representación de relaciones transitivas

- Un predicado de relación *r* es transitivo si es cierto todo lo que pueda inferirse con la regla

  r(X, Y) :- r(X, Z), r(Z, Y).

- Hay relaciones que son claramente transitivas, como la relación *es_un* y la relación *es_parte_de* (y *jefe*)

- Definiendo explícitamente la transitividad nos ahorramos la representación de todo lo que se inferiría por transitividad
  - Establecer como hechos las relaciones directas (entre individuos o clases inmediatamente próximos)

    r(a, c). % por ejemplo

    r(c, e). % por ejemplo
  - E inferir, a partir de la regla, las relaciones indirectas (más lejanas)

    r(a, e) % por ejemplo

Representación de relaciones transitivas

- Dada la siguiente base de conocimiento

  es_un(dumbo, elefante).

  es_un(elefante, vertebrado).

  es_un(vertebrado, animal).

  es_un(X, Y):- es_un(X, Z), es_un(Z, Y).

- Ante la consulta

  ?- es_un(dumbo, animal).

  el intérprete aplica la regla dos veces, finalizando la demostración con éxito

- Pero entra en un ciclo ∞ de llamadas a la regla recursiva si la consulta es

  ?- es_un(flipper, animal).

  ERROR: Out of local stack

Representación de relaciones transitivas

- El establecimiento de la transitividad es una herramienta muy útil que nos ahorra tener que introducir en la base de conocimiento grandes cantidades de hechos, pero
  debemos garantizar la convergencia de las llamadas recursivas
- Para ello, se suelen utilizar dos predicados diferentes: uno para establecer las relaciones directas y otro distinto para preguntar por relaciones directas o indirectas
- Por ejemplo, la clausura transitiva de *tieneParte*

```
tieneParteTrans(X, Y) :- tieneParte(X, Y).
tieneParteTrans(X, Y) :-
                    tieneParte(X, Z),
                    tieneParteTrans(Z, Y).
```

  - *tieneParte* se utilizará para establecer las relaciones directas como hechos y *tieneParteTrans* para lanzar objetivos

Herencia de predicados de propiedad

- La herencia es un mecanismo muy útil que permite disminuir significativamente el número de hechos a representar en la BC
- Normalmente involucra a dos predicados, uno de relación y otro de propiedad
- Un predicado de propiedad *p* se hereda con respecto al predicado de relación *r* si alguna de estas dos reglas es correcta:

```
p(X, Valor) :- r(X, Y), p(Y, Valor).
p(X, Valor) :- r(Y, X), p(Y, Valor).
% Es recomendable que r sea una relación directa
  (establecida sólo con hechos Prolog)
```

- Por ejemplo, el apellido se hereda de padres a hijos

```
tieneApellido(X, Apellido) :-
                    esHijoDe(X, Y),
                    tieneApellido(Y, Apellido).
```

Herencia de predicados de propiedad

- Normalmente, las propiedades se heredan de arriba a abajo (de lo más general a lo más particular) a través de la jerarquía definida por la relación *r*
  - Ejemplo claro de herencia: cuando la relación *r* es la relación *es_un*
    - Por ejemplo, la propiedad universal de *tener esqueleto* se hereda de la clase *vertebrado* hacia abajo a través de la relación *es_un*
  - Las propiedades universales suelen heredarse de arriba abajo

- En otros casos, la propiedad se hereda de abajo a arriba (de lo particular a lo general)
  - Las propiedades existenciales suelen heredarse así
    - Por ejemplo, la propiedad existencial de *vivir en España* se hereda de la clase *hombre* hacia arriba a la clase *persona* a través de la relación *es_un*
      - Si algunos hombres viven en España, podemos concluir que algunas personas viven en España *(un hombre es una persona)*

Herencia de predicados de propiedad

- Por ejemplo, dada la base de conocimiento

```
es_un(portaaviones, buque_de_guerra).
es_un(buque_de_guerra, barco).
es_un(barco, vehículo).
propósito(vehículo, transporte).
```

y la regla de herencia para la propiedad *propósito* a través de la relación *es_un*

```
propósito(X, P):- es_un(X, Y), propósito(Y, P).
```

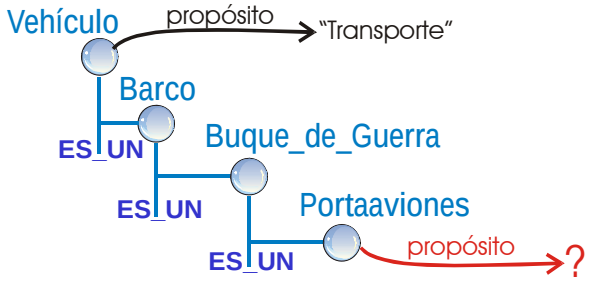
- ¿Qué respondería el sistema ante la siguiente consulta?

```
?- propósito(portaaviones, P).
```

Herencia de predicados de propiedad

?- propósito(portaaviones, P).

- El intérprete ascendería por la jerarquía *es_un*, aplicando 3 veces la regla de herencia para obtener **P=transporte**



es_un(portaaviones, buque_de_guerra).
es_un(buque_de_guerra, barco).
es_un(barco, vehículo).
propósito(vehículo, transporte).
propósito(X, P):- es_un(X, Y), propósito(Y, P).

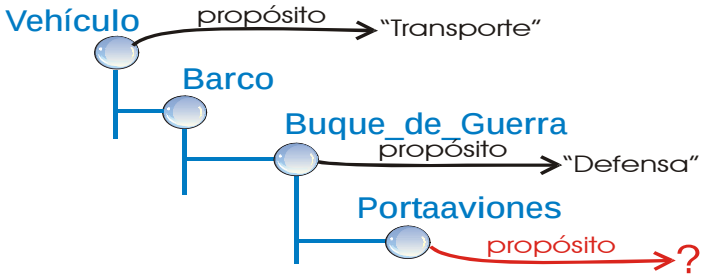
Herencia de predicados de propiedad

?- propósito(portaaviones, P).

- Si hubiéramos tenido un hecho

  propósito(buque_de_guerra, defensa).

  el sistema hubiera devuelto primero **P=defensa**



es_un(portaaviones, buque_de_guerra).
es_un(buque_de_guerra, barco).
es_un(barco, vehículo).
propósito(vehículo, transporte).
propósito(X, P):- es_un(X, Y), propósito(Y, P).

Herencia de predicados de propiedad

- Valor de una propiedad para un determinado objeto
  - El intérprete comprueba primero si dicha propiedad ha sido establecida directamente como un hecho
    - ¡Sólo si los hechos aparecen antes que la regla de herencia!
  - Si no es así y existe una regla de herencia de esa propiedad a través de cierta relación *r*, se moverá por la jerarquía para encontrar el objeto más próximo (según esa relación) para el que ha sido definida la propiedad y la tomará directamente de él heredándola
  - ¿Y las excepciones?

Herencia de predicados de propiedad

- Excepciones a la herencia
  - Pueden solucionarse colocándolas como “hechos con corte” al principio

⇨

```
propósito(buque_de_guerra, defensa) :- !.
propósito(vehículo, transporte).
propósito(X, P):- es_un(X, Y), propósito(Y, P).
```

  - El sistema ya sólo devuelve **P=defensa**
- El orden adecuado es
  1. Excepciones
  2. Propiedad estereotípica
  3. Regla de herencia

Herencia de predicados de propiedad

- En el ejemplo anterior de herencia se ha supuesto que *es_un* es una relación directa establecida sólo con hechos

  propósito(X, P):- es_un(X, Y), propósito(Y, P).

- Un predicado de propiedad *p* se hereda con respecto al predicado de relación *r* si alguna de estas dos reglas es correcta:

  p(X, Valor) :- r(X, Y), p(Y, Valor).

  p(X, Valor) :- r(Y, X), p(Y, Valor).

  % Es recomendable que *r* sea una relación directa (establecida sólo con hechos)

- Podríamos haber obtenido los mismos resultados aplicando primero

  es_un(X, Y):- es_un(X, Z), es_un(Z, Y).

  hasta obtener que *un portaaviones es un vehículo* y luego aplicando la regla de herencia una única vez

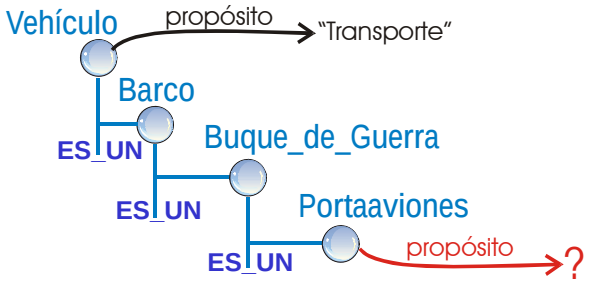
Herencia de predicados de propiedad

- Aplicamos primero

  es_un(X, Y):- es_un(X, Z), es_un(Z, Y).

  y luego aplicamos la regla de herencia una única vez

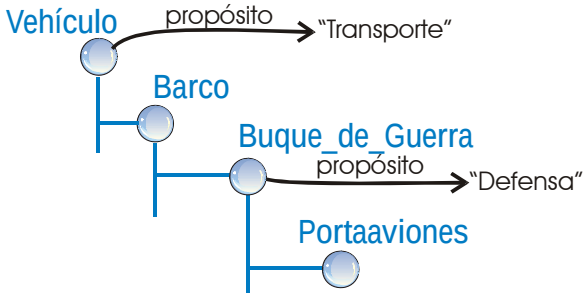
  propósito(X, P):- es_un(X, Y), propósito(Y, P).



- ¿Mismo resultado siempre?
- ¿Por qué hemos recomendado el uso de relaciones directas, establecidas sólo con hechos?

Herencia de predicados de propiedad

```
es_un(portaaviones, buque_de_guerra).
es_un(buque_de_guerra, barco).
es_un(barco, vehículo).
es_un(X, Y):- es_un(X, Z), es_un(Z, Y).
propósito(buque_de_guerra, defensa) :- !.
propósito(vehículo, transporte).
propósito(X, P):- es_un(X, Y), propósito(Y, P).
```



?- propósito(submarino, P). ⇨ ciclo ∞

Herencia de predicados de propiedad

- Herencia + relaciones "no directas"
  - Puede funcionar pero hay que tener mucho cuidado...

```
es_un(portaaviones, buque_de_guerra).
es_un(buque_de_guerra, barco).
es_un(barco, vehículo).

propósito(buque_de_guerra, defensa) :- !.
propósito(vehículo, transporte).

propósito(X, P):- es_un_trans(X, Y), propósito(Y, P).


es_un_trans(X, Y):- es_un(X, Y).
es_un_trans(X, Y):- es_un(X, Z), es_un_trans(Z, Y).
```

Herencia de predicados de propiedad

- En cambio, utilizando exclusivamente la herencia no correríamos el riesgo de la no terminación, ya que la regla de herencia no sería aplicable al fallar el objetivo **es_un(submarino, Y)**

```
es_un(portaaviones, buque_de_guerra).
es_un(buque_de_guerra, barco).
es_un(barco, vehículo).

propósito(buque_de_guerra, defensa) :- !.
propósito(vehículo, transporte).

propósito(X, P):- es_un(X, Y), propósito(Y, P).
```


Recomendaciones para la convergencia

- Al definir un predicado escribiremos los hechos antes que las reglas
- Evitaremos la recursividad por la izquierda
  - Por ejemplo, no se debe utilizar

    p(X, Valor) :- p(Y, Valor), r(X, Y).

    para representar la herencia sino

    p(X, Valor):-r(X, Y), p(Y, Valor).

    asegurándose de que la relación *r* se establezca en forma de hechos o bien garantizando su adecuada convergencia, en caso de existir reglas para el predicado *r*
- Utilizaremos dos predicados distintos cuando se quieran representar predicados transitivos siempre que haya riesgo de generar ramas infinitas en el árbol de búsqueda
  - Haremos esto en general para diferenciar predicados establecidos directamente de los que sirvan para realizar inferencias

Representación de relaciones simétricas

- Cuando se representan relaciones simétricas deben establecerse sólo en un determinado sentido
  - Por ejemplo, los predicados *familiar_de, igual_a*
  - Para todos estos predicados, lo normal es representar una única vez el hecho y establecer la simetría
- Si establecemos la simetría poniendo directamente

  igual_a(X, Y) :- igual_a(Y, X).

  tendríamos problemas de convergencia
- Lo más simple es definir un nuevo predicado que será el único con el que hagamos consultas: cierre simétrico de la relación

  igual_a_Sim(X, Y) :- igual_a(X, Y).

  igual_a_Sim(X, Y) :- igual_a(Y, X).
  - Los hechos se establecerán exclusivamente con el predicado *igual_a* una única vez por pareja *(igual_a: antisimétrica)*

Listas

- Constructoras de listas en Prolog Funcional
  - Lista vacía

  [] **[]**
  - Lista no vacía

  [Cabeza | Resto] **(x:xs)**
    - *Cabeza* es un elemento (el primero) y *Resto* es la lista sin el 1º elemento
- Más patrones para listas
  - De exactamente un elemento

  [X]
  - De al menos 2

  [X, Y | Resto] **(x:y:ys)**
    - **|** separa los elementos que enumeramos de la variable que representa el resto de la lista **[X | Y | Resto] es incorrecto**

Listas

- Podemos representar listas por enumeración de sus elementos, escribiéndolos entre corchetes y separados por comas

  [a,b,c], [], [a, [b,c]], etc.

- Las implementaciones de Prolog suelen incluir predicados para el manejo de listas como *member, append* o *length*
  - SWI-Prolog los tiene predefinidos y se cargan por defecto
  - SICStus Prolog también, pero no se cargan por defecto. Si se quiere disponer de estos predicados (u otros TADs habituales) es necesario cargar la biblioteca pertinente *(ver manual en ayuda)*

```
:- use_module(library(lists)).
```


No existe la asignación

- En lenguajes de programación declarativa no hay asignación
  - *is/2* no es asignación

```
VariableONúmero is ExpresiónAritmética
```

    - Se evalúa la expresión aritmética
    - Tiene éxito si y sólo si el lado izquierdo unifica con el resultado
  - Tenéis disponible la unificación para devolver resultados

```
relacionados(X, Y, C) :-
        arista(R, X, Y),
        C = [X, R, Y].          % unificación
```

  - Lo mejor es usar unificación implícitamente: equivalente, pero más eficiente

```
relacionados(X, Y, [X, R, Y]) :-
        arista(R, X, Y).
```

Especificación de predicados

- Se suelen anotar en la especificación de un predicado Prolog las posibles limitaciones de uso
  - **+**: el parámetro ha de estar instanciado, es decir, no puede ser una variable libre (sin ligar)
  - **?**: el parámetro puede estar instanciado o no
  - **-**: el parámetro debe ser una variable libre

  % predicado(+Instanciado, ?InstanciadoOVar, -Var)
- Aunque una de las ventajas de la programación lógica son los múltiples modos de uso que puede tener un predicado, es habitual que no estén contemplados todos
  - Por eficiencia
    - Uso habitual del corte, pensando en un modo de uso concreto
  - Uso de aritmética Prolog
    - suma(+X, +Y, ?Z) si **suma(X, Y, Z) :- Z is X+Y.**
  - Características impuras en general: assert, retract...

Bibliografía

- **Rich, E. y Knight, K.**
  Artificial Intelligence.
  McGraw-Hill, 1991, 2ª edición.
- **Russell, S. y Norvig, P.**
  Inteligencia Artificial: Un Enfoque Moderno.
  Prentice Hall, 2004, 2ª edición.
- **Luger, G.F.**
  Artificial Intelligence.
  Addison-Wesley, 2005, 5ª edición.
- **Nilsson, J.**
  Artificial Intelligence: A New Synthesis.
  Prentice Hall, 2004, 2ª edición.

Bibliografía

- **Jackson, P.**
  Introduction to Expert Systems.
  Addison-Wesley, 1999.
- **Gonzalez, A. J. y Dankel, D. D.**
  The Engineering of Knowledge Based Systems:
  Theory and Practice
  Prentice Hall, 1993.
- **Rowe, Neil C.**
  Artificial Intelligence through Prolog.
  Prentice-Hall, 1988.