Universidade de Aveiro

*Inteligência Artificial* (*LEI, LECI*)

# Tópicos de IA: Representação do Conhecimento

Ano lectivo 2024/2025

Regente: Luís Seabra Lopes

# Tópicos de Inteligência Artificial

- Agentes
  - Noção de agente
  - Objectivo da Inteligência Artificial
  - Agentes reactivos e deliberativos
  - Propriedades do mundo de um agente
  - Arquitecturas de agentes
- Representação do conhecimento
- Técnicas de resolução de problemas

# Representação do conhecimento

- Redes semânticas
  - Redes semânticas genéricas
  - Sistemas de "frames"
  - Herança e raciocício não-monotónico
  - Relação com diagramas UML
  - Exemplo para aulas práticas
- Lógica proposicional e lógica de primeira ordem
- Linguagem KIF
- Engenharia do conhecimento
- Ontologia geral
- Redes de Bayes

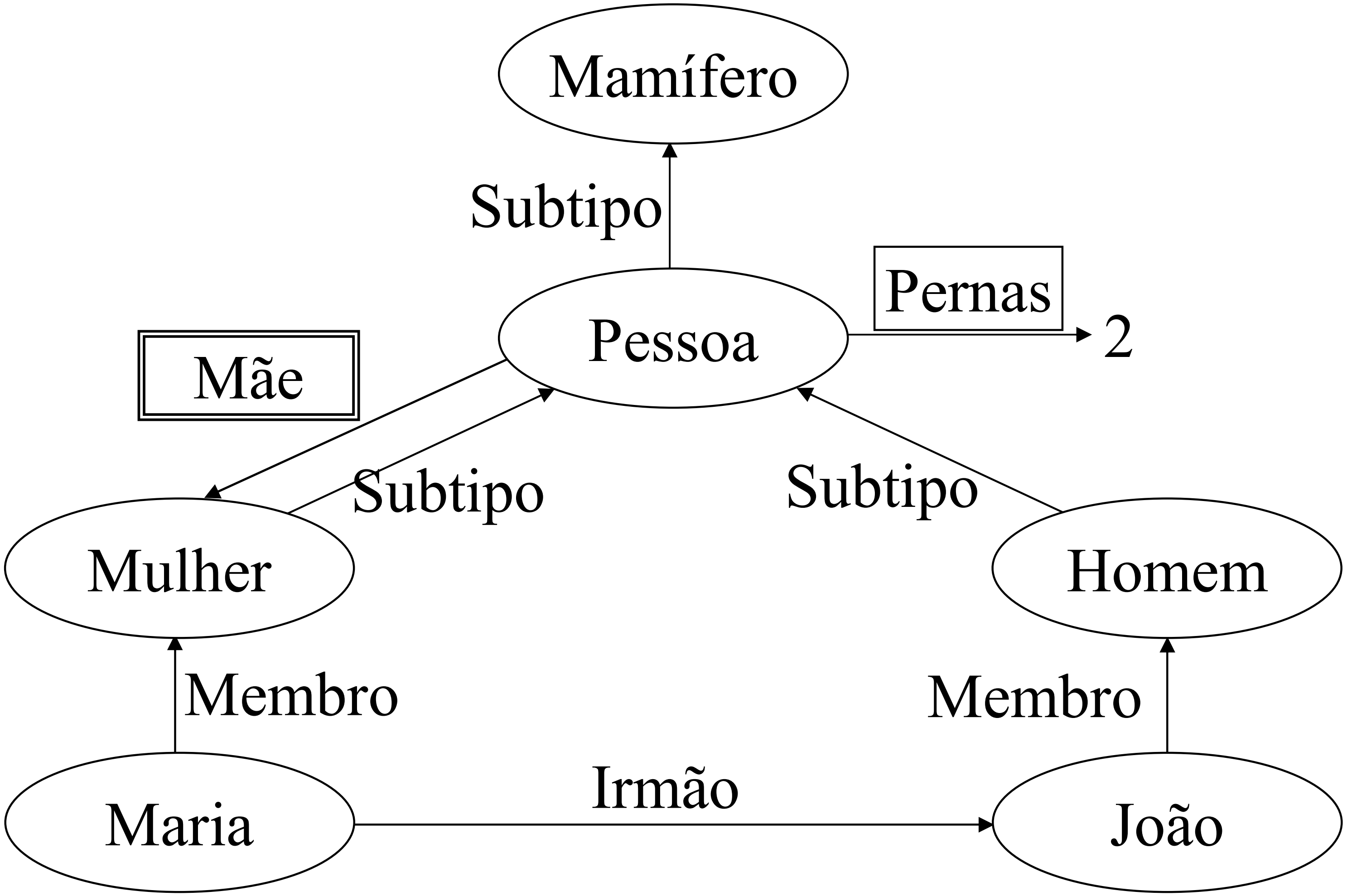
# Redes Semânticas

- Redes semânticas são representações gráficas do conhecimento
- Têm a vantagem da legibilidade
- As redes semânticas podem ser tão expressivas quanto a lógica de primeira ordem

# Redes Semânticas – tipos de relações

- *Sub-tipo* (ou *sub-conjunto* ou ainda *sub-classe*):
  - $A \subset B$
- *Membro* (ou *instância*):
  - $A \in B$
- Relação objecto-objecto:
  - $R(A,B)$
- Relação conjunto-objecto:
  - $\forall x\ x \in A \Rightarrow R(x,B)$
- Relação conjunto-conjunto:
    - $\forall x\ x \in A \Rightarrow \exists y\ (y \in B \wedge R(x,y))$

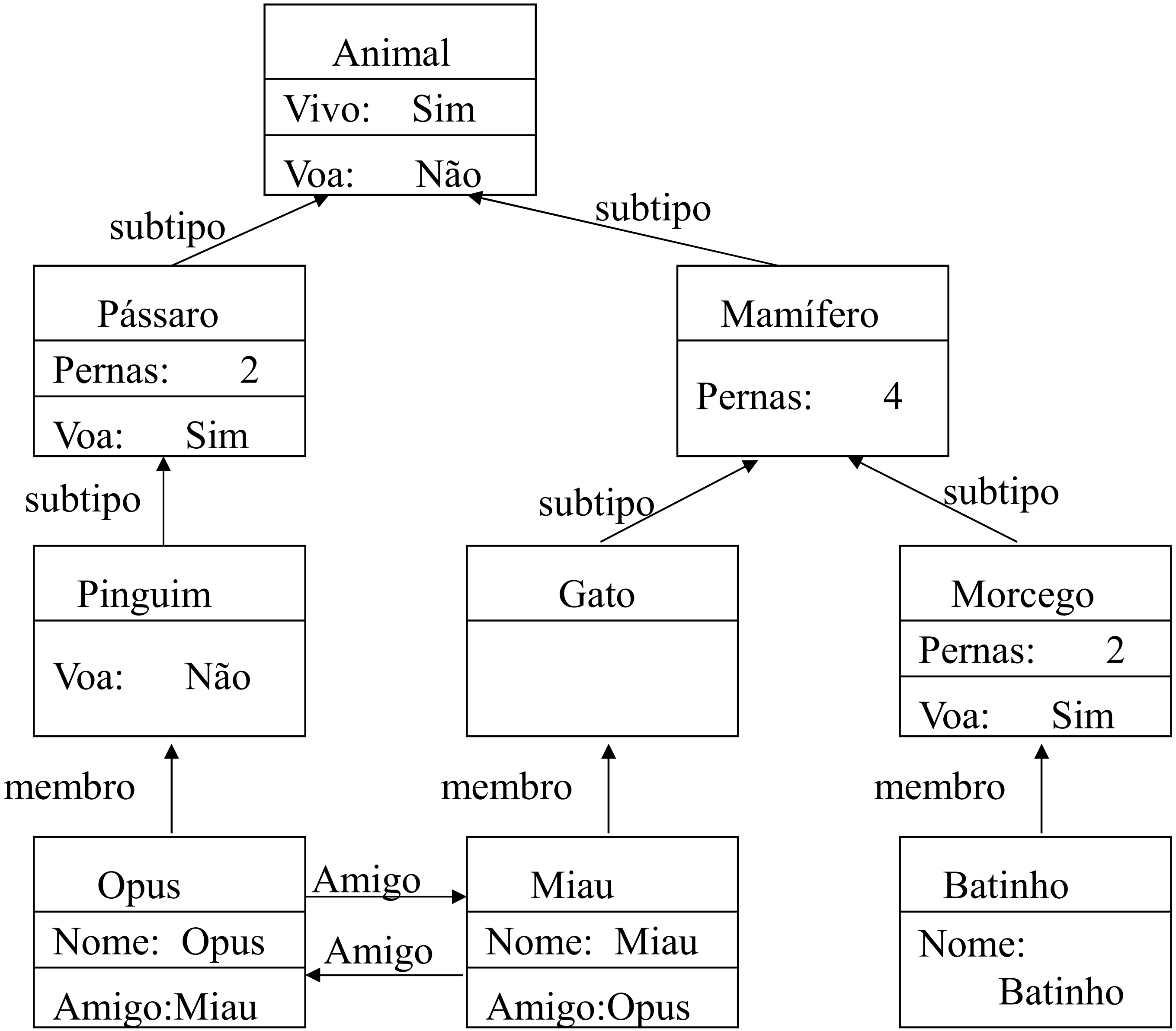
# Redes semânticas – exemplo



# Redes Semânticas - herança

- As relações de *sub-tipo* e *membro* permitem a herança de propriedades:
  - O sub-tipo herda todas as propriedades dos tipos mais abstractos dos quais descende
  - A instância herda todas as propriedades do tipo a que pertence
- A inferência pode ser vista como o seguimento das ligações entre entidades com vista à herança de propriedades
- Pode implementar-se raciocínio não monotónico através do estabelecimento de <u>valores por defeito</u> e o correspondente <u>cancelamente da herança</u>. (ver exemplo)

# Redes Semânticas - exemplo



# Redes Semânticas – Métodos e Demónios

- Normalmente, por razões computacionais, usam-se redes semânticas bastante menos expressivas do que a lógica de primeira ordem
- Deixa-se de lado:
  - Negação
  - Disjunção
  - Quantificação
- Em contra-partida, nomeadamente nos chamados sistemas de *frames*, usam-se métodos e demónios:
  - *Métodos* têm uma semântica similar à da programação orientada por objectos.
  - *Demónios* são procedimentos cuja execução é disparada automáticamente quando certas operações de leitura ou escrita são efectuadas.

# GOLOG – Um gestor de objectos em Prolog

- O GOLOG é um gestor de objectos cuja semântica é próxima das *frames* (Seabra Lopes, 1995)
- Algumas primitivas:
  - new_frame(Frame)
  - new_slot(Slot)
  - new_value(Frame,Slot,Value)
  - new_relation(Rel,Trans,Restrictions,Inv)
    - Trans ::= transitive | intransitive
    - Restrictions ::= all | none | inclusion(Slots) | exclusion(Slots)
  - call_method(Frame,Method,ParamList)
  - new_demon(Frame,Slot,Proc,Access,When,Effect).
    - Access ::= if_read | if_write | if_delete | if_execute
    - When ::= before | after
    - Effect ::= alter_value | side_effect

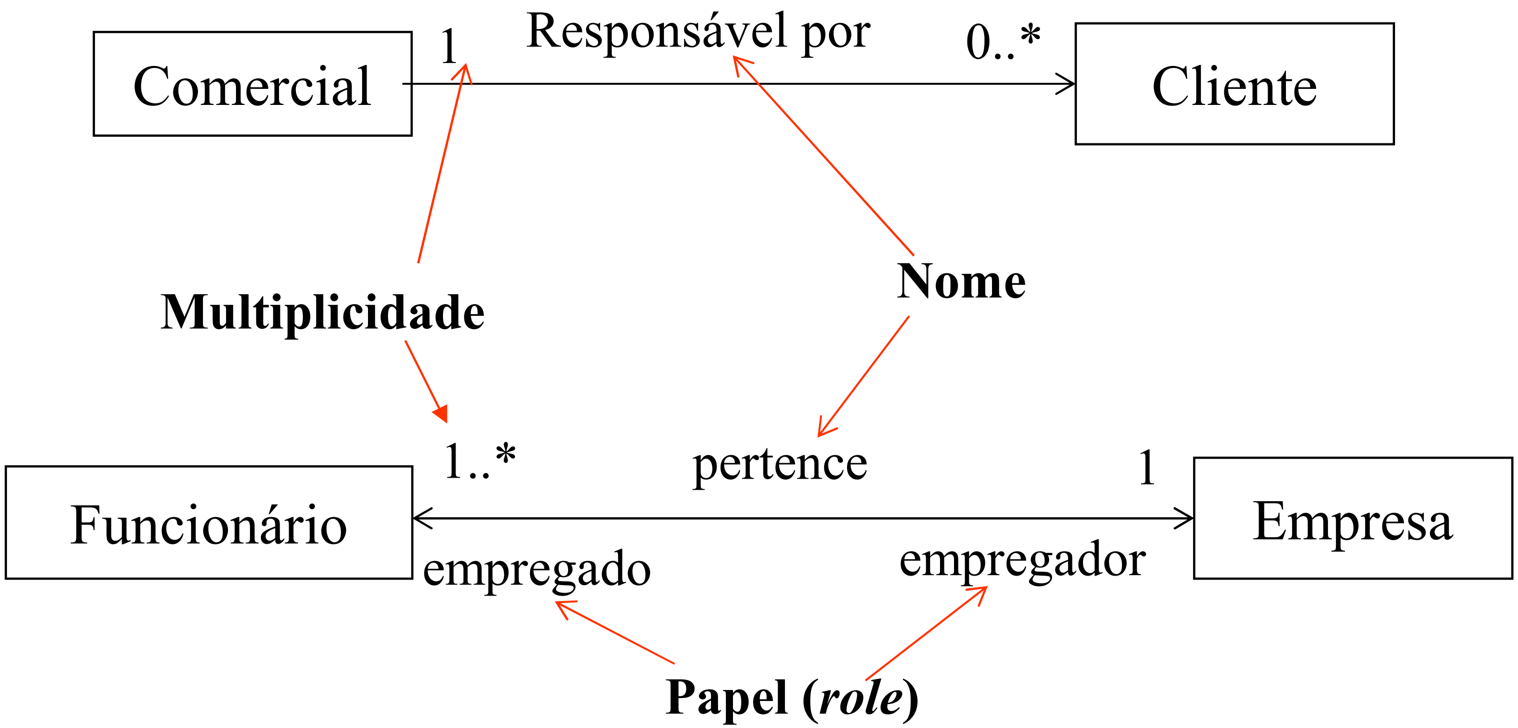
# UML / Diagramas de Classes - 1

- Na linguagem gráfica UML (*Unified Modelling Language*), os diagramas de classes definem as relações existentes entre as diferentes classes de objectos num dado domínio
  - **Classe** – descrição de um conjunto de objectos que partilham os mesmos atributos, operações, relações e semântica; estes objectos podem ser:
    - Objectos físicos
    - Conceitos que não tenham uma existência palpável
  - **Atributo** – uma propriedade de uma classe
  - **Operação (ou método)** – é a implementação de um serviço que pode ser executado por qualquer objecto da classe
  - **Instância** de uma classe – um objecto que pertence a essa classe, ou seja, constitui uma concretização dessa classe
    - As instâncias de uma classe diferenciam-se pelos valores dos atributos
    - As instâncias "herdam" todos os atributos e métodos da sua classe

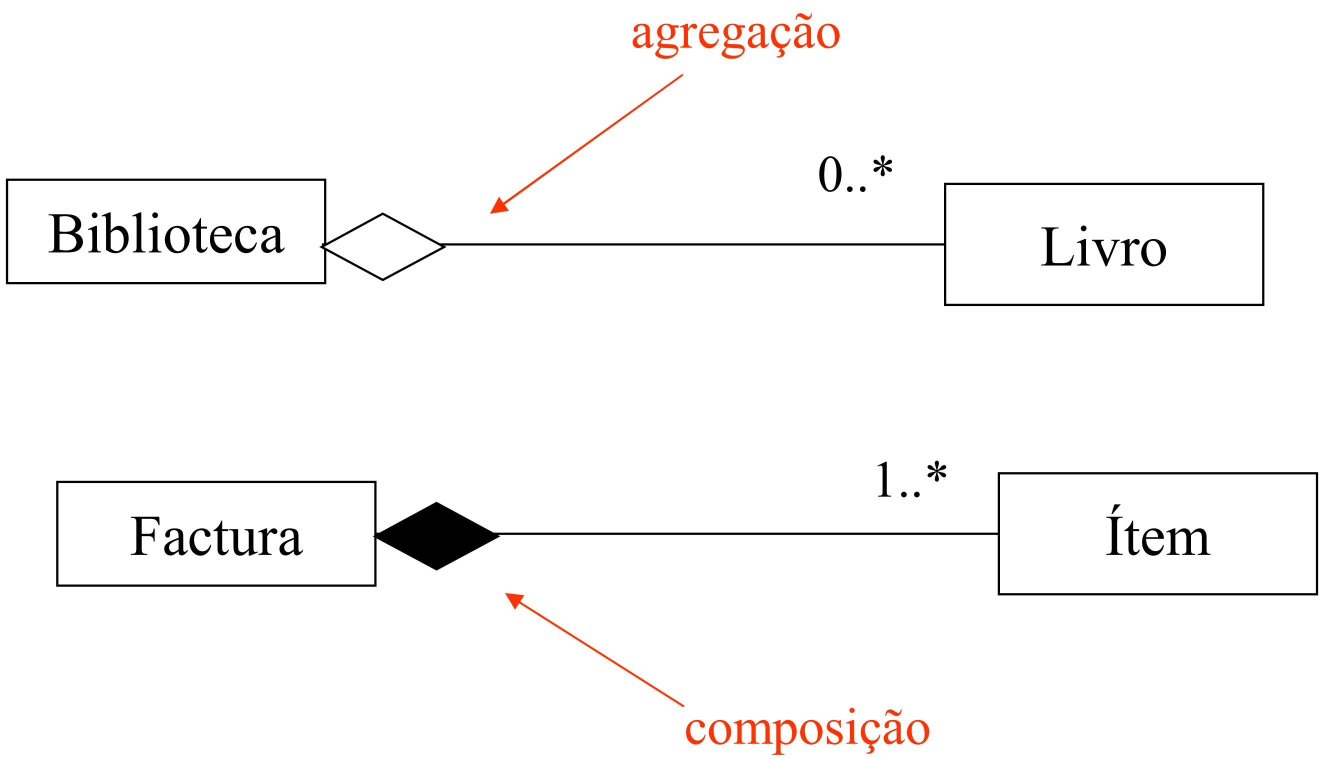
# UML / Diagramas de Classes – 2: Relações

- Um aluno lê um livro
  - **Associação** : classe A “usa a”/ “interage com” classe B
- Um recibo tem vários itens
  - **Composição**: relação todo-parte
- Uma biblioteca tem vários livros
  - **Agregação**: representa relação estrutural entre instâncias de duas classes, em que a classe agregada existe independentemente da outra
- Um aluno é uma pessoa
  - **Generalização**: classe A generaliza classe B e B especializa A (super-classe/sub-classe)

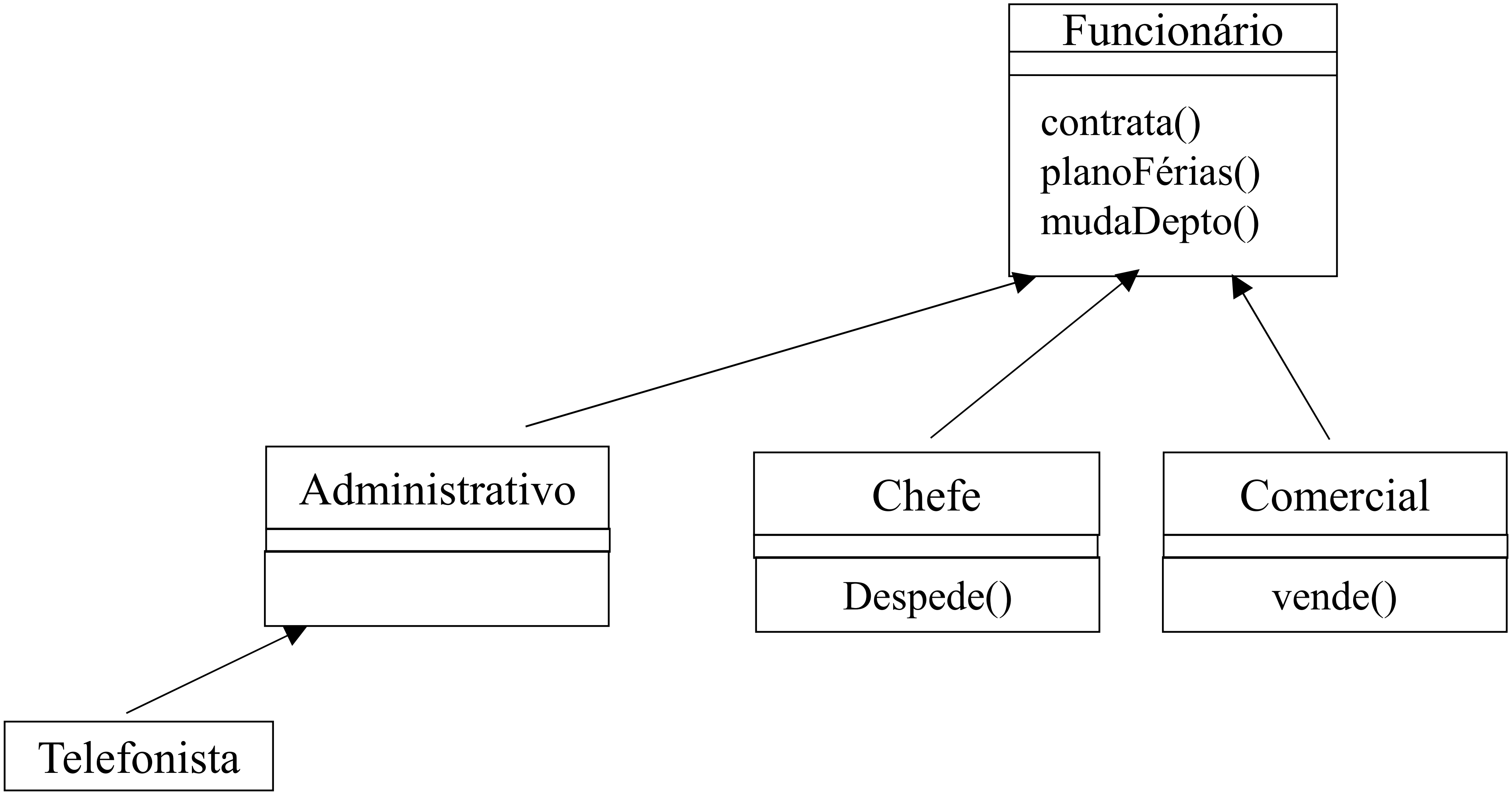
# UML / Diagramas de Classes – 3: Associação



# UML / Diagramas de Classes – 4: Agregação e Composição



# UML / Diagramas de Classes – 5: Generalização



# Redes semânticas *versus* UML

| *Redes semânticas* | *UML* |
|---|---|
| subtipo(SubTipo,Tipo) | Generalização em diagramas de classes |
| membro(Obj,Tipo) | Diagramas de objectos |
| Relação Objecto/Objecto | Associação, agregação e composição em diagramas de objectos |
| Relação Objecto/Tipo | não tem |
| Relação Tipo/Tipo | Associação, agregação e composição em diagramas de classes |

# Indução versus Dedução

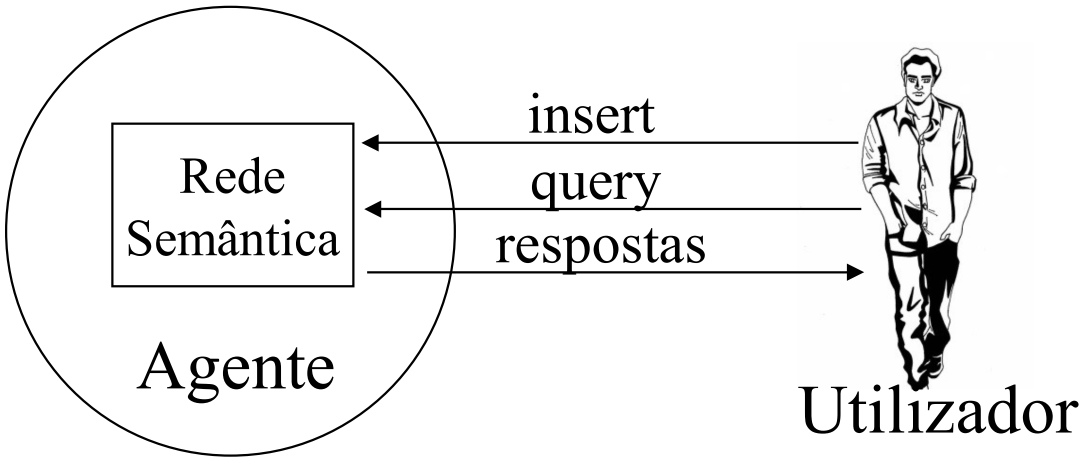
- Dedução – permite inferir casos particulares a partir de regras gerais
  - Preserva a verdade
  - As regras de inferência apresentadas anteriormente são regras dedutivas
- Indução – é o oposto da dedução; permite inferir regras gerais a partir de casos particulares
  - É a base principal da <u>aprendizagem</u>

# Indução

- Exemplo:
  - Casos conhecidos
    - O gato Tareco gosta de leite
    - O gato Pirata gosta de leite
  - Regra inferida
    - Os gatos (normalmente) gostam de leite
  - Nas redes semânticas, a indução pode ser vista como uma “herança de baixo para cima”

# Redes Semânticas em Python

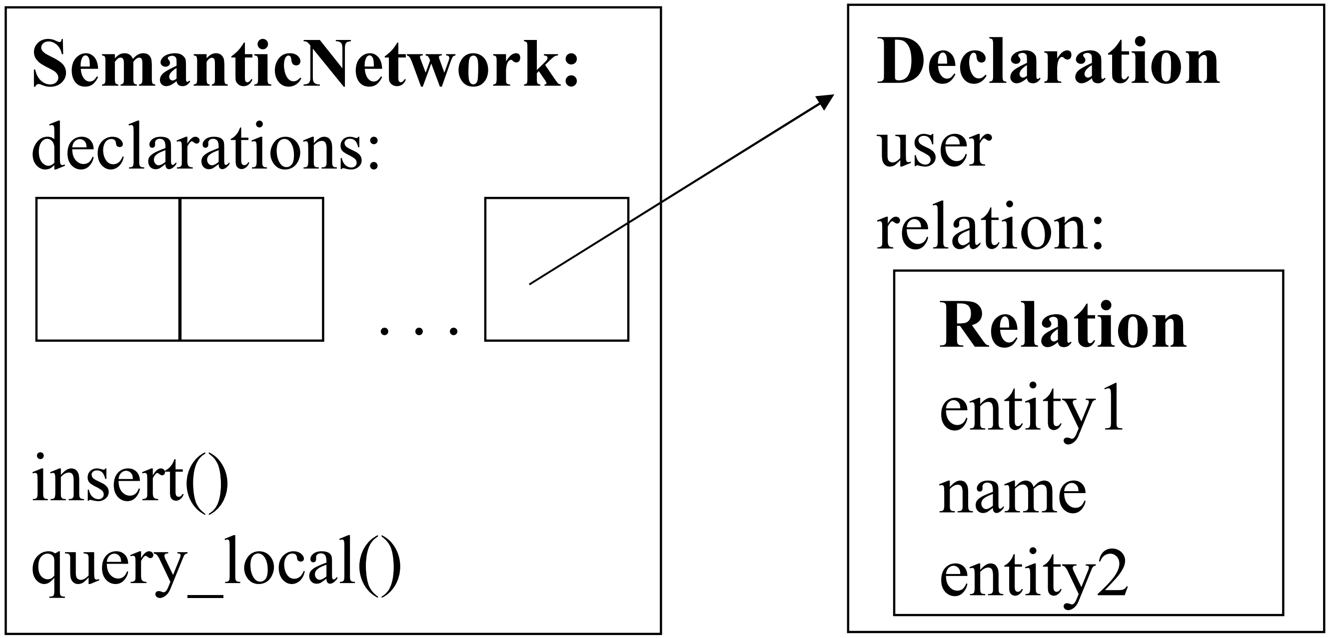
- Vamos criar uma rede semântica, definida como um conjunto de declarações
- Cada declaração associa uma relação semântica ao indivíduo que a declarou
  - Declaration(user,relation)



# Redes Semânticas em Python

- Uma relação pode ser dos três tipos seguintes:
  - `Member(obj, type)` – um objecto é membro de um tipo
  - `Subtype(subtype,supertype)` – um tipo é subtipo de outro
  - `Association(entity1,name,entity2)` – uma entidade (objecto ou tipo) está associada a outra
- Operações principais:
  - `insert` – introduzir uma nova declaração
  - `query_local` – questionar a rede semântica sobre as declarações existentes
- Através da introdução incremental de declarações por diferentes interlocutores, emulamos de forma simplificada um processo de aprendizagem, em que o conhecimento é adquirido através da interacção com outros agentes

# Redes Semânticas em Python




- Nota: ver módulo usado nas aulas práticas

# Representação do conhecimento

- Redes semânticas
  - Redes semânticas genéricas
  - Sistemas de “frames”
  - Herança e raciocício não-monotónico
  - Relação com diagramas UML
  - Implementação em Python
- Lógica proposicional e lógica de primeira ordem
- Linguagem KIF
- Engenharia do conhecimento
- Ontologia geral
- Redes de Bayes

# Lógicas

- Uma lógica tem:
  - Síntaxe - descreve o conjunto de frases ou fórmulas que é possível escrever.
    - Nota: Estas são as <u>fórmulas bem formadas</u> ou WFF (do inglês *Well Formed Formula*)
  - Semântica - estabelece a relação entre as frases escritas nessa linguagem e os factos que representam.
    - Exemplo: a semântica da lógica proposicional é definida através de tabelas de verdade.
  - Regras de inferência - permitem manipular as frases, gerando umas a partir das outras; as regras de inferência são a base do processo de raciocínio.

# Lógica Proposicional

- Baseada em proposições
  - *Proposição* = frase declarativa elementar que pode ser verdadeira ou falsa
  - Exemplos:
    - “A neve é branca”
    - “O açúcar é um hidrocarbono”
  - Variável proposicional = uma variável que toma o valor de verdade de uma dada proposição
- Uma fórmula em lógica proposicional é composta por uma ou mais variáveis proposicionais ligadas por conectivas lógicas
  - Uma frase proposicional elementar é um frase composta por uma única variável proposicional

# Lógica de Primeira Ordem

- Componentes:
  - *Objectos* ou *entidades*
    - Exemplos: 1215, DDinis, Aveiro
  - *Expressões funcionais* (*termos*)
    - Exemplos: Potencia(4,3), Pai-de(Paulo)
    - Nota 1: Os objectos podem ser considerados como expressões funcionais cuja aridade é zero
    - Nota 2: A noção de *termo* engloba quer os objectos quer as expressões funcionais
  - *Predicados* ou *relações*
    - Exemplos: Pai(Rui, Paulo), Irmão(Paulo,Rosa)
    - Nota: Por definição, os argumentos de um predicado são termos.
- Aqui, as frases elementares são os predicados

# Conectivas Lógicas

- Servem para combinar frases lógicas elementares por forma a obter frases mais complexas
- As conectivas lógicas são as seguintes:
    - $\neg$ (negação)
    - $\wedge$ (conjunção)
    - $\vee$ (disjunção)
    - $\Rightarrow$ (implicação)
    - $\Leftrightarrow$ (equivalência)
- Precedências (prioridades) de acordo com a ordem acima
    - Os parentesis são dispensáveis quando abraçam operações de maior precedência

# Variáveis, Quantificadores

- Na lógica de primeira ordem, os argumentos dos predicatos podem ser variáveis, usadas para representar termos não especificados
  - Exemplos: *x*, *y*, *pos*, *soma*, *pai*, ...
- Quantificação universal
  - $\forall x\ A \equiv$ 'Qualquer que seja $x$, a fórmula $A$ é verdadeira'
  - Se $A$ é uma fórmula bem formada, então $\forall x\ A$ também é uma fórmula bem formada.
- Quantificação existencial
  - $\exists x\ A \equiv$ 'Existe um $x$, para o qual a fórmula $A$ é verdade'
  - Se $A$ é uma fórmula bem formada, então $\exists x\ A$ também é uma fórmula bem formada.

# Lógica de Primeira Ordem - Gramática

*Fórmula* → *FórmulaAtómica*
 | *Fórmula Conectiva Formula*
 | *Quantificador Variável*, ... *Fórmula*
 | '¬' *Fórmula*
 | '(' *Fórmula* ')'

*FórmulaAtómica* → *Predicado* '(' *Termo* ',' ... )' | *Termo* '=' *Termo*

*Termo* → *Função* '(' *Termo* ',' ... )' | *Constante* | *Variável*

*Conectiva* → '⇒' | '∧' | '∨' | '⇔'

*Quantificador* → '∃' | '∀'

*Constante* → A | X1 | Paula | ...

*Variável* → a | x | s | ...

*Predicado* → Portista | Cor | ...

*Função* → Registo | Mãe | ...

# Exemplos

- "Todos (os estudantes) em Oxford são espertos":
  - $\forall x$ Estuda($x$,Oxford) $\Rightarrow$ Esperto($x$)
  - Erro comum: Usar $\wedge$ em vez de $\Rightarrow$

    $\forall$x Estuda($x$,Oxford) $\wedge$ Esperto($x$)

    Significa "Todos estão em Oxford e todos são espertos"
- "Alguém em Oxford é esperto":
  - $\exists x$ Estuda($x$,Oxford ) $\wedge$ Esperto($x$)
  - Erro comum: Usar $\Rightarrow$ em vez de $\wedge$

    $\exists$x Estuda($x$,Oxford) $\Rightarrow$ Esperto($x$)

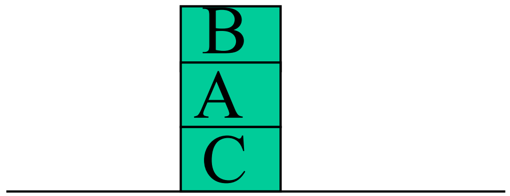
    qualquer estudante de outra universidade forneceria uma interpretação verdadeira.
- "Existe uma pessoa que gosta de toda a gente"
  - $\exists x\ \forall y$ Gosta($x$,$y$)

# Interpretações em Lógica Proposicional

- Na lógica proposicional, uma <u>interpretação</u> de uma fórmula é uma atribuição de valores de verdade ou falsidade às várias proposições que nela ocorrem
  - Exemplo: a fórmula $A \wedge B$ tem quatro interpretações possíveis.
- <u>Satisfatibilidade</u> - Uma interpretação satisfaz uma fórmula sse a fórmula toma o valor 'verdadeiro' para essa interpretação.
- <u>Modelo de uma fórmula</u> - uma interpretação que satisfaz essa fórmula.
- <u>Tautologia</u> - uma fórmula cujo valor é 'verdadeiro' em qualquer interpretação.

# Interpretações em Lógica de Primeira Ordem

- Uma interpretação de uma fórmula em lógica de primeira ordem é o estabelecimento de uma correspondência entre as várias constantes que ocorrem na fórmula e os objectos do mundo, funções e relações que essas constantes representam.
  - Exemplo:
    - Objectos: A, B, C, Chão
    - Funções: nenhuma
    - Relações:
      - Em_cima_de: { <B,A>, <A,C>, <C,Chão> }
      - Livre: { <B> }
    - Assumindo o estado dado pela figura, esta interpretação constitui um modelo



# Lógica - Regras de Substituição - I

- São válidas quer na lógica proposicional quer na lógica de primeira ordem
- Leis de DeMorgan
  $\neg (A \wedge B) \equiv \neg A \vee \neg B$
  $\neg (A \vee B) \equiv \neg A \wedge \neg B$
- Dupla negação:
  $\neg\neg A \equiv A$
- Definição da implicação:
  $A \Rightarrow B \equiv \neg A \vee B$
- Transposição:
  $A \Rightarrow B \equiv \neg B \Rightarrow \neg A$

# Lógica - Regras de Substituição - II

- Comutação
  $A \wedge B \equiv B \wedge A$
  $A \vee B \equiv B \vee A$
- Associação:
  $(A \wedge B) \wedge C \equiv A \wedge (B \wedge C)$
  $(A \vee B) \vee C \equiv A \vee (B \vee C)$
- Distribuição:
  $A \wedge (B \vee C) \equiv (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$
  $A \vee (B \wedge C) \equiv (A \vee B) \wedge (A \vee C)$

# Lógica - Regras de Substituição - III

- Leis de DeMorgan generalizadas (estas são específicas da lógica de primeira ordem):

$$\neg(\forall x\ P(x)) \equiv \exists x\ \neg P(x)$$
$$\neg(\exists x\ P(x)) \equiv \forall x\ \neg P(x)$$

# Exercícios

- Representar as seguintes frases em lógica de primeira ordem:
  - Só um aluno chumbou a História
  - Nem todos os estudantes se inscreveram simultaneamente a *Introdução à Inteligência Artificial* e *Sistemas Inteligentes*
  - A melhor nota a História foi mais elevada do que a melhor nota a Biologia
  - Todos os Portistas gostam de Pinto da Costa
  - Existe um Sportinguista que gosta de todos os Benfiquistas que não são espertos
  - Existe um Barbeiro que barbeia toda a gente menos ele próprio

# CNF e Forma Clausal

- Uma fórmula na *forma normal conjuntiva* (abreviado *CNF*, de *Conjuntive Normal Form*) é uma fórmula que consiste de uma conjunção de cláusulas.
- Uma *cláusula* é uma fórmula que consiste de uma disjunção de literais.
- Um *literal* é uma fórmula atómica (literal positivo) ou a negação de uma fórmula atómica (literal negativo).
  - Nota: na lógica proposicional uma fórmula atómica é uma proposição.
- *Forma clausal* é a representação de uma fórmula CNF através do conjunto das respectivas cláusulas

# Conversão de uma Fórmula Proposicional para CNF e forma clausal

- Através dos seguintes passos:
  - Remover implicações
  - Reduzir o âmbito de aplicação das negações
  - Associar e distribuir até obter a forma CNF
- Exemplo:
  - Fórumula original: $A \Rightarrow (B \wedge C)$
  - Após remoção de implicações: $\neg A \vee (B \wedge C)$
  - Forma CNF: $(\neg A \vee B) \wedge (\neg A \vee C)$
  - Forma clausal: $\{ \neg A \vee B, \neg A \vee C \}$

# Conversão para forma clausal em Lógica de Primeira Ordem - I

- Renomear variáveis, de forma a que cada quantificador tenha uma variável diferentes
- Remover as implicações
- Reduzir o âmbito das negações, ou seja, aplicar a negação
- Para estas transformações, aplicar as regras de substituição já apresentadas

Exemplo

Fórmula original:
$\forall x\ \forall y\ \neg(\ p(x,y) => \forall y\ q(y,y)\ )$

Variáveis renomeadas:
$\forall a\ \forall b\ \neg(\ p(a,b) => \forall c\ q(c,c)\ )$

Implicações removidas:
$\forall a\ \forall b\ \neg(\neg\ p(a,b) \vee \forall c\ q(c,c)\ )$

Negações aplicadas:
$\forall a\ \forall b\ \ (\ p(a,b) \wedge \exists c\ \neg q(c,c)\ )$

# Conversão para forma clausal em Lógica de Primeira Ordem - II

- Skolemização
  - Nome dado à eliminação dos quantificadores existenciais
  - Substituir todas as ocorrências de cada variável quantificada existencialmente por uma função cujos argumentos são as variáveis dos quantificadores universais exteriores
- Remover quantificadores universais

Exemplo (cont.)

Skolemizada aplicada:
$\forall a\ \forall b\ \ (\ p(a,b) \wedge \neg q(f(a,b),\ f(a,b))\ )$

Quantificadores removidos:
$p(a,b) \wedge \neg q(f(a,b),\ f(a,b))$

# Conversão para forma clausal em Lógica de Primeira Ordem - III

- Converter para CNF
  - Usar as regras de substituição relativas à comutação, associação e distribuição
- Converter para a forma clausal, ou seja, eliminar conjunções
- Renomear variáveis de forma a que uma variável não apareça em mais do que uma fórmula

Exemplo (cont.)

Convertida para a forma clausal:
$\{ p(a,b) , \neg q(f(a,b), f(a,b)) \}$

Variáveis renomeadas:
$\{ p(a_1,b_1) , \neg q(f(a_2,b_2), f(a_2,b_2)) \}$

# Lógica - Regras de Inferência

- Modus Ponens: $\{ A, A \Rightarrow B \} \vdash B$
- Modus Tolens: $\{\neg B, A \Rightarrow B \} \vdash \neg A$
- Silogismo hipotético: $\{A \Rightarrow B, B \Rightarrow C \} \vdash A \Rightarrow C \}$
- Conjunção: $\{ A, B \} \vdash A \wedge B$
- Eliminação da conjunção: $\{A \wedge B \} \vdash A$
- Disjunção: $\{ A, B \} \vdash A \vee B$
- Silogismo disjuntivo (ou resolução unitária):
  $\{ A \vee B, \neg B \} \vdash A$
- Resolução: $\{ A \vee B, \neg B \vee C \} \vdash A \vee C$
- Dilema construtivo:
  $\{ (A \Rightarrow B ) \wedge (C \Rightarrow D), A \vee C \} \vdash B \vee D$
- Dilema destrutivo:
  $\{ (A \Rightarrow B ) \wedge (C \Rightarrow D), \neg B \vee \neg D \} \vdash \neg A \vee \neg C$

# Lógica de Primeira Ordem - Regras de Inferência específicas

- *Instanciação universal*:
  $\{\forall x\ P(x)\} \vdash P(A)$
- *Generalização existencial*
  $\{P(A)\} \vdash \exists x\ P(x)$

# Consequências Lógicas, Provas

- Consequência lógica
  - Diz-se que A é consequência lógica do conjunto de fórnulas em $\Delta$, e escreve-se

    $$\Delta \models A,$$

    se A toma o valor 'verdadeiro' em todas as interpretações para as quais cada uma das fórmulas em $\Delta$ toma também o valor verdadeiro.
- Definição de Prova
  - Uma sequência de fórmulas$\{ A_1, A_2, \ldots, A_n \}$ é uma prova (ou dedução) de $A_n$ a partir de um conjunto de fórmulas $\Delta$ sse cada uma das fórmulas $A_i$ está em $\Delta$ ou pode ser inferida a partir das fórmulas $A_1$ .. $A_{i-1}$.
  - Neste caso escreve-se: $\Delta \vdash A_n$

# Correcção, Completude

- Correcção - Diz-se que um conjunto de regras de inferência é correcto se todas as fórmulas que gera são consequências lógicas
- Completude - Diz-se que um conjunto de regras de inferência é completo se permite gerar todas as consequências lógicas.
- Um sistema de inferência correcto e completo permite tirar consequências lógicas sem ter que analisar caso a caso as várias interpretações.

# Metateoremas

- Teorema da dedução:
  - Se $\{ A_1, A_2, \ldots, A_n \} \models B$, então $A_1 \wedge A_2 \wedge \ldots \wedge A_n \Rightarrow B$, e vice-versa.
- Redução ao absurdo:
  - Se o conjunto de fórmulas $\Delta$ é satisfatível (logo tem pelo menos um modelo) e $\Delta \cup \{\neg A\}$ não é satisfatível, então $\Delta \models A$.

# Resolução não é Completa

- A resolução é uma regra de inferência correcta (gera fórmulas necessáriamente verdadeiras)

$$\{ A \vee B, \neg B \vee C \} \vdash A \vee C$$

- A resolução não é completa.
  - Exemplo - A resolução não consegue derivar a seguinte consequência lógica:

$$\{ A \wedge B \} \models A \vee B$$

# Refutação por Resolução

- A refutação por resolução é um mecanismo de inferência completo
  - Neste caso, usa-se a resolução para provar que a negação da consequência lógica é inconsistente com a premissa (*meta-teorema da redução ao absurdo*).
  - No exemplo dado, prova-se que
    $$(A \wedge B) \wedge \neg(A \vee B)$$
    é inconsistente (basta mostrar que é possível derivar a fórmula 'Falso').
- Passos da refutação por resolução:
  - Converter a premissa e a negação da consequência lógica para um conjunto de cláusulas.
  - Aplicar a resolução até obter a cláusula vazia.

# Substituições, Unificação

- A aplicação da *substituição* $s = \{ t_1/x_1, \ldots, t_n/x_n \}$ a uma fórmula $W$ denota-se $SUBST(W,s)$ ou $Ws$; Significa que todas as ocorrências das variáveis $x_1, \ldots,$ $x_n$ em $W$ são substituidas pelos termos $t_1, \ldots, t_n$
- Duas fórmulas $A$ e $B$ são unificáveis se existe uma substituição s tal que $As = Bs$. Nesse caso, diz-se que $s$ é uma *substituição unificadora*.
- A *substituição unificadora mais geral* (ou *minimal*) é a mais simples (menos extensa) que permite a unificação.

# Resolução e Refutação na Lógica de Primeira Ordem

- Resolução:
  $$\{ A \vee B, \neg C \vee D \} \mid\!- \text{SUBST}(A \vee D, g)$$
  em que B e C são unificáveis sendo g a sua substituição unificadora mais geral
- A regra da resolução é correcta
- A regra da resolução não é completa
- Tal como na lógica proposicional, também aqui a refutação por resolução é completa

# Resolução com Claúsulas de Horn

- O mecanismo de prova baseado na refutação por resolução é completo e correcto mas não é eficiente (na verdade é NP-completo)
- Uma cláusula de Horn é uma cláusula que tem no máximo um literal positivo
  - Exemplos: $A$ $\quad$ $\neg A \vee B$ $\quad$ $\neg A \vee B \vee \neg C$ $\quad$ $\neg A \vee \neg B$
- Existem algoritmos de dedução baseados em cláusulas de Horn cuja complexidade temporal é linear
  - As linguagens Prolog e Mercury baseiam-se em cláusulas de Horn

# Representação do conhecimento

- Redes semânticas
  - Redes semânticas genéricas
  - Sistemas de “frames”
  - Herança e raciocício não-monotónico
  - Relação com diagramas UML
  - Implementação em Python
- Lógica proposicional e lógica de primeira ordem
- Linguagem KIF
- Engenharia do conhecimento
- Ontologia geral
- Redes de Bayes

# KIF (= Knowledge Interchange Format)

- Esta é uma linguagem desenhada para representar o conhecimento trocado entre agentes.
  - A motivação para a criação do KIF é similar à que deu origem a outros formatos de representação, como o PostScript.
- Pode ser usada também para representar os modelos internos de cada agente.
- Características principais:
  - Semântica puramente declarativa (o Prolog é também uma linguagem declarativa, mas a semântica depende em parte do modelo de inferência)
  - Pode ser tão ou mais expressiva quanto a lógica de primeira ordem.
  - Permite a representação de meta-conhecimento (ou seja, conhecimento sobre o conhecimento)

# KIF – características gerais

- O mundo é conceptualizado em termos de objectos e relações entre objectos
- Uma relação é um conjunto arbitrário de listas de objectos.
  - Exemplo: a relação $<$ é o conjunto de todos os pares (x,y) em que $x<y$.
- O universo de discurso é o conjunto de todos os objectos cuja existência é conhecida, presumida ou suposta.
  - Os objectos podem ser *concretos* ou *abstratos*
  - Os objectos podem ser *primitivos* (não decomponíveis) ou *compostos*

# KIF - Componentes da linguagem

- Caracteres
- Lexemas
  - Lexemas especiais (aqueles que têm um papel pré-definido na própria linguagem)
  - Palavras
  - Códigos de caracteres
  - Blocos de códigos de caracteres
  - Cadeias de caracteres
- Expressões
  - Termos - objectos primitivos ou compostos
  - Frases - expressões com valor lógico
  - Definições - frases verdadeiras por definição

# KIF - termos

- Constante
- Variável individual
- Expressão funcional

  (*functor arg1 .. argn*)

  (*functor arg1 .. argn seqvar*)
- Lista

  (listof *t1 … tn*)
- Termo lógico

  (if *c1 t1 .. cn tn default*)
- Código de caracter, bloco de códigos de caracteres e cadeia de caracteres
- Citação (quotation)

  (quote *lista*) ou '*lista*

# KIF - frases

- Constante: true, false
- Equação
  (= *termo1 termo2*)
- Inequação
  (/= *termo1 termo2*)
- Frase relacional
  (*relação t1 .. tn*)
- Frase lógica: construida com as conectivas lógicas (‘not’, ‘and’, ‘or’, ‘=>’, ‘<=’, ‘<=>’)
- Frase quantificada
  (forall *var1 … varn frase*)
  (exists *var1 … varn frase*)

# KIF - definições

- Definição de objectos
  - Igualdade: (defobject *s* := *t*)
    Exemplo: (defobject nil := (listof))
  - Conjunção: (defobject *s p1* .. *pn*)
  - etc.
- Definição de funções
  - (deffunction *f* (*v1* .. *vn*) := *t*)
  - Exemplo:
    - (deffunction head (?l) := (if (= (listof ?x @items) ?1) ?x)
- Definição de relações (=predicados)
  - (defrelation *r* (*v1* .. *vn*) := *p*)
  - etc.
  - Exemplos:

```
(defrelation null (?1) := (= ?1 (listof)))
(defrelation list (?x) :=
        (exists (@1) (= ?x (listof (@1))))
```

# KIF - meta-conhecimento

- Pode formalizar-se conhecimento sobre o conhecimento
- O mecanismo da citação (quotation) permite tratar expressões como objectos
- Por exemplo a ocorrência da palavra **joão** numa expressão designará uma pessoa; entretanto a expressão **(quote joão)** ou **'joão** designa a própria palavra **joão** e não o objecto ou pessoa a que ela se refere.
- Outros exemplos:

```
(acredita joão '(material lua queijo))
(=> (acredita joão ?p) (acredita ana ?p))
```

- Graficamente, podemos ilustrar da forma seguinte:

(quote Representação) $\xrightarrow{\textit{refere-se a}}$ Representação $\xrightarrow{\textit{refere-se a}}$ Objecto

# KIF - dimensões de conformação

- KIF é uma linguagem altamente expressiva
- No entanto, KIF tende a sobrecarregar os sistemas de geração e de inferência
- Por isso, foram definidas várias dimensões de conformação
- Um perfil de conformação é uma selecção de níveis de conformação para cada uma das dimensões referidas

# KIF - perfis de conformação

- Foram definidos os seguintes perfis de conformação:
  - Lógica - atómica, conjuntiva, positiva, lógica, baseada em regras (de Horn ou não, recursivas ou não)
  - Complexidade dos termos - termos simples (constantes e variáveis), termos complexos
  - Ordem - *proposicional*, *primeira ordem* (contem variáveis, mas os functorese as relações  são constantes), *ordem superior* (os functores e relações podem ser variáveis)
  - Quantificação - conforme se usa ou não
  - Meta-conhecimento - conforme se usa ou não

# Representação do conhecimento

- Redes semânticas
  - Redes semânticas genéricas
  - Sistemas de “frames”
  - Herança e raciocício não-monotónico
  - Relação com diagramas UML
  - Implementação em Python
- Lógica proposicional e lógica de primeira ordem
- Linguagem KIF
- Engenharia do conhecimento
- Ontologia geral
- Redes de Bayes

# Engenharia do Conhecimento

- Uma *base de conhecimento* (BC) é um conjunto de representações de *factos* e *regras* de funcionamento do mundo; factos e regras recebem a designação genérica de *frases*.
- Engenharia do conhecimento é o processo ou actividade de construir bases de conhecimento. Isto envolve:
  - Estudar o domínio de aplicação – frequentemente através de entrevistas com peritos (processo de *aquisição de conhecimento*)
  - Determinar os objectos, conceitos e relações que será necessário representar
  - Escolher um vocabulário para entidades, funções e relações (por vezes chamado *ontologia*)
  - Codificar conhecimento genérico sobre o domínio (um conjunto de *axiomas*)
  - Codificar descrições para problemas concretos, interrogar o sistema e obter respostas.
  - Por vezes o domínio é tão complexo que não é praticável codificar à mão todo o conhciemento necessário. Neste caso usa-se *aprendizagem automática*.

# Identificação de objectos, conceitos e relações - 1

- Na modelação em análise de sistemas e engenharia de software coloca-se o mesmo problema
  - Assim, para um problema complexo de representação do conhecimento, não é descabido seguir uma metodologia de análise em boa parte similar às que se usam nos sistemas de informação
- Algumas das palavras que usamos para descrever um domínio em linguagem natural dão naturalmente origem a nomes de objectos, conceitos e relações
  - Substantivos comuns → *conceitos* (também chamados *classes* ou *tipos*)
  - Substantivos próprios → *objectos* (também chamados *instâncias*)
  - Verbo "ser" → pode indicar uma relação de *instanciação* (entre objecto e tipo) ou de *generalização* (entre subtipo e tipo)
  - Verbos "ter" e "conter" → podem indicar uma relação de composição
  - Outros verbos → podem sugerir outras relações relevantes

# Identificação de objectos, conceitos e relações - 2

- Convem avaliar a importância para o problema das palavras utilizadas bem como dos objectos, conceitos e relações subjacentes
  - Não considerar substantivos que identifiquem objectos, conceitos ou relações irrelevantes para o problema
  - Quando vários substantivos aparecem a referir-se ao mesmo conceito, escolher o mais representativo ou adequado
- Um conceito mais abstracto pode ser criado atribuindo-lhe o que é comum a outros dois ou mais conceitos previamente identificados

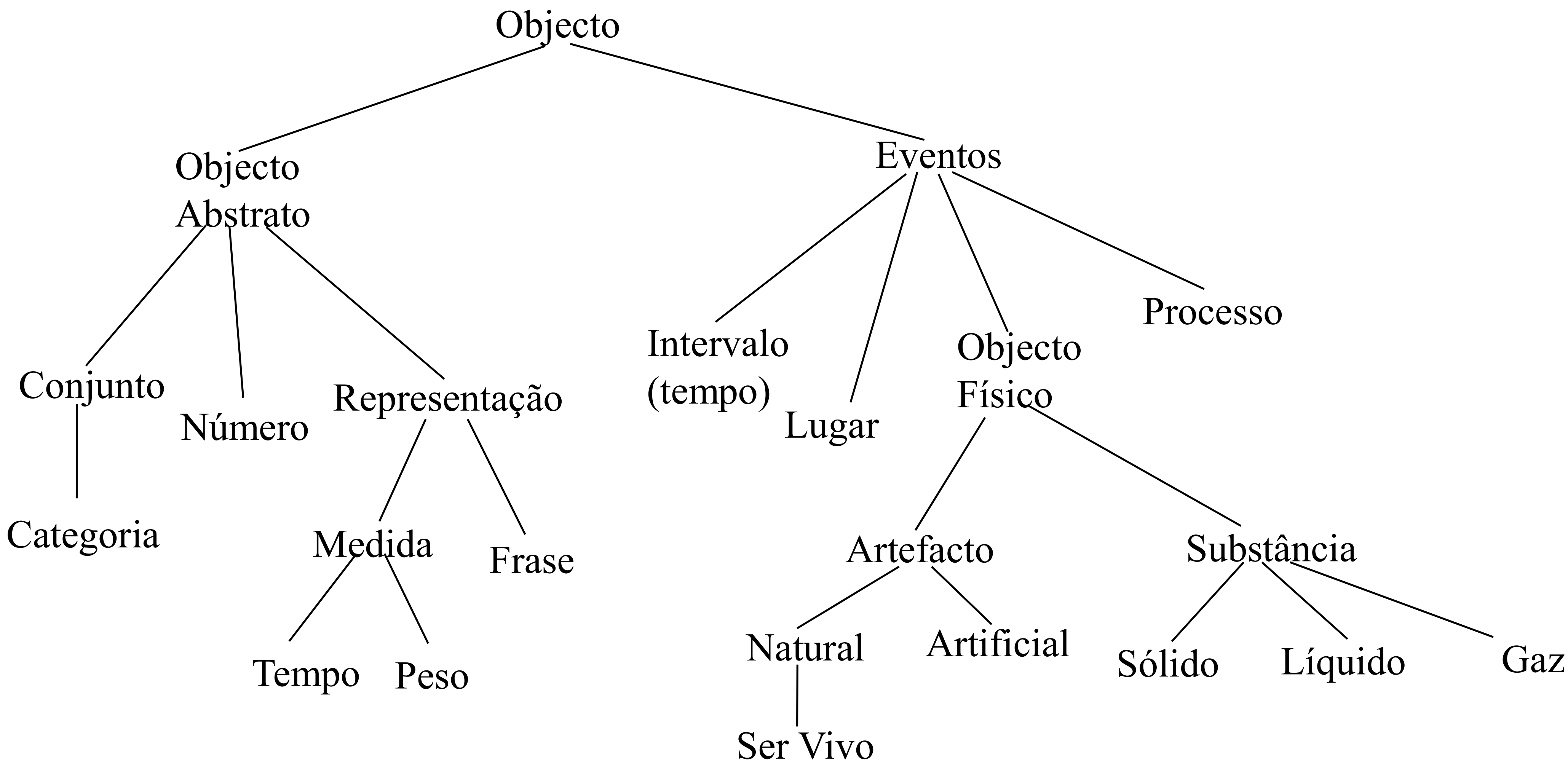
# Ontologias

- Uma ontologia é um vocabulário sobre um domínio conjugado com relações hierárquicas como *membro* e *subtipo* e eventualmente outras.
- O objectivo de uma ontologia é captar a essência da organização do conhecimento num domínio.

# Ontologia Geral

- Uma ontologia geral, aplicável a uma grande variedade de domínios de aplicação, envolve as seguintes noções:
  - Categorias, tipos ou classes
  - Medidas numéricas
  - Objectos compostos
  - Tempo, espaço e mudanças
  - Eventos e processos (eventos contínuos)
  - Objectos físicos
  - Substâncias
  - Objectos abstractos e crenças

# Uma possível ontologia geral



# Representação do conhecimento

- Redes semânticas
  - Redes semânticas genéricas
  - Sistemas de “frames”
  - Herança e raciocício não-monotónico
  - Relação com diagramas UML
  - Implementação em Python
- Lógica proposicional e lógica de primeira ordem
- Linguagem KIF
- Engenharia do conhecimento
- Ontologia geral
- Redes de Bayes

# Redes de crença bayesianas

- Também conhecidas simplesmente como "redes de Bayes"
- Permitem representar conhecimento impreciso em termos de um conjunto de variáveis aleatórias e respectivas dependências
  - As dependências são expressas através de probabilidades condicionadas
  - A rede é um grafo dirigido acíclico

# Axiomas das probabilidades

- Para uma qualquer proposição *a*, a sua probabilidade é um valor entre 0 e 1:

$$0 \leq P(a) \leq 1$$

- Proposições necessariamente verdadeiras têm probabilidade 1

$$P(true) = 1$$

- Proposições necessariamente falsas têm probabilidade 0

$$P(false) = 0$$

- A probabilidade da disjunção é a soma das probabilidades subtraída da probabilidade da intercepção:

$$P(a \vee b) = P(a) + P(b) - P(a \wedge b)$$

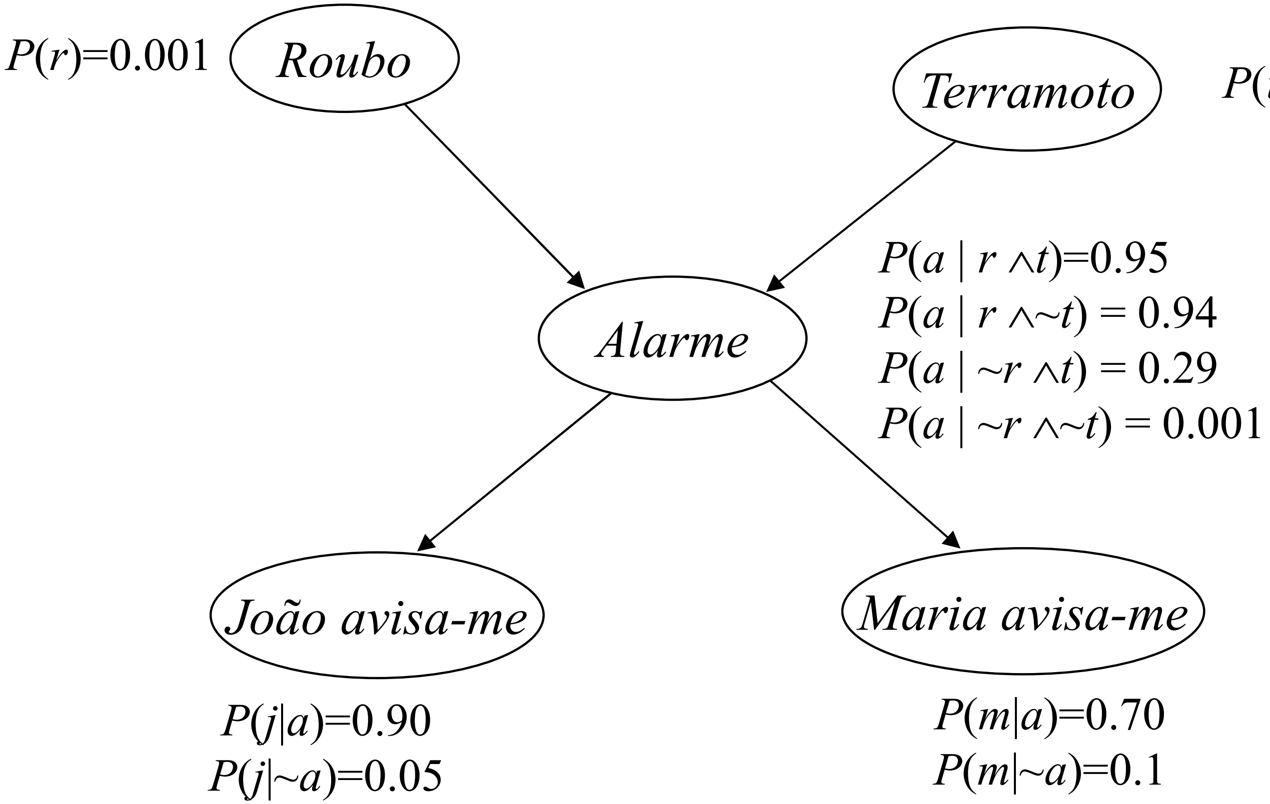
# Probabilidades condicionadas

- Uma probabilidade condicionada $P(a|b)$ identifica a probabilidade de ser verdadeira a proposição $a$ na condição de (isto é, sabendo nós que) a proposição $b$ é verdadeira
- Pode calcular-se da seguinte forma:

$$P(a \mid b) = \frac{P(a \wedge b)}{P(b)}$$

# Redes de crença bayesianas – exemplo

- Por simplicidade, focamos em variáveis aleatórias booleanas:



# Redes de crença bayesianas – probabilidade conjunta

- A probabilidade conjunta identifica a probabilidade de ocorrer uma dada combinação de valores de todas as variáveis da rede:

$$\boxed{P(x_1 \wedge \ldots \wedge x_n) = \prod_{i=1}^{n} P(x_i \mid pais(x_i))}$$

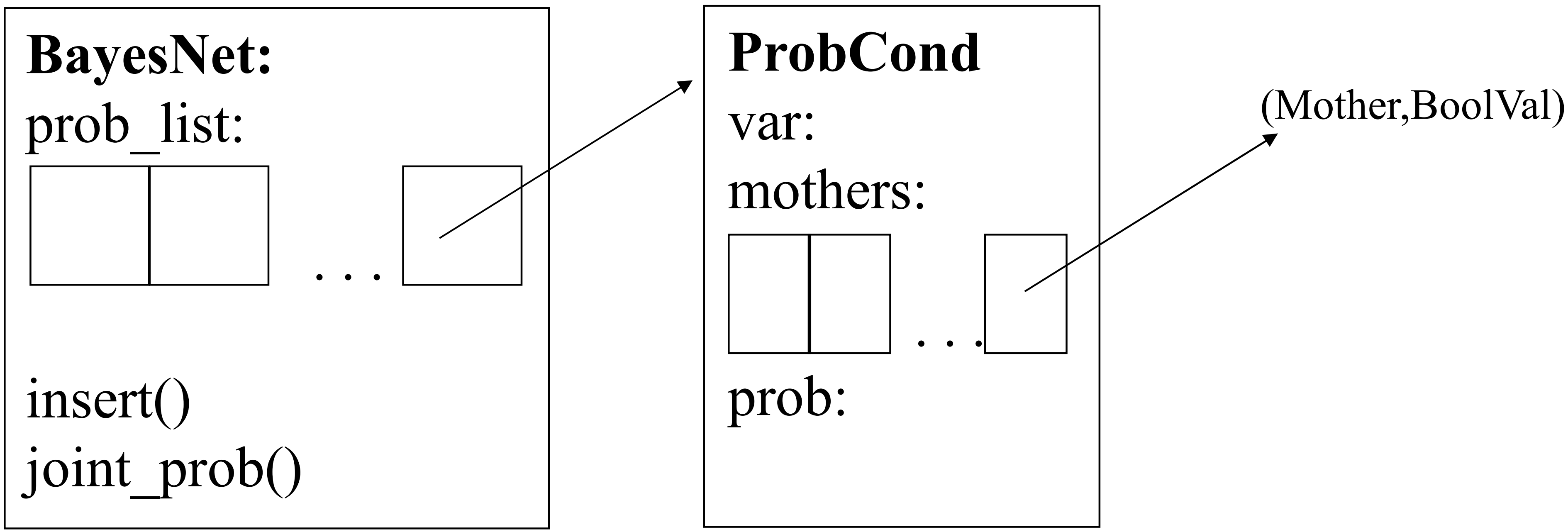
- Assim, no exemplo anterior, a probabilidade de o alarme tocar e o João e a Maria ambos avisarem num cenário em que não há roubo nem terramoto, é dada por:

$$\boxed{\begin{aligned} &P(j \wedge m \wedge a \wedge \sim t \wedge \sim r) \\ &= P(j \mid a) \times P(m \mid a) \times P(a \mid \sim r \wedge \sim t) \times P(\sim r) \times P(\sim t) \\ &= 0.90 \times 0.70 \times 0.001 \times 0.999 \times 0.998 \\ &= 0.000628 \end{aligned}}$$

# Redes Bayesianas em Python

- Vamos criar uma rede de crença bayesiana, representada com base numa lista de probabilidades condicionadas
  - Classe BayesNet()
- A probabilidade condicionada de uma dada variável ser verdadeira, dados os valores (True ou False) das variáveis mães, é representado pela seguinte classe:
  - Classe ProbCond(var,mother_vals,prob)
  - Exemplo: ProbCond("a", [ ("r",True), ("t",True) ], 0.95)
- Operações principais:
  - insert – introduzir uma nova probabilidade condicionada na rede
  - joint_prob – obter a probabilidade conjunta para uma dada conjunção de valores de todas as variáveis da rede

# Redes de crença em Python




- Nota: ver módulo usado nas aulas práticas

# Redes de crença bayesianas – probabilidade individual

- A probabilidade individual é a probabilidade de um valor específico (*verdadeiro* ou *falso*) de uma variável
- Calcula-se somando as probabilidades conjuntas das situações em que essa variável tem esse valor específico
- O cálculo das probabilidades conjuntas pode restringir-se à variável considerada e às outras variáveis das quais depende (ascendentes na rede bayesiana)
  - Exemplo: o conjunto dos ascendentes de "João avisa" é { "alarme", "roubo" e "terramoto" }

# Redes de crença bayesianas – probabilidade individual

$$P(x_i = v_i) = \sum_{\substack{a_j \in \{v,f\} \\ j=1,\ldots,k}} P(x_i \wedge a_1 \wedge \ldots \wedge a_k)$$

- Seja:
  - $C = \{ x_1, \ldots, x_n \}$ – conjunto de variáveis da rede
  - $x_i \in C$ – uma qualquer variável da rede
  - $v_i \in \{v,f\}$ – valor de $x_i$ cuja probabilidade se pretende calcular
  - $\{ a_1, \ldots, a_k \} \subset$ C – conjunto das variáveis da rede que são ascendentes de $x_i$