



SCC-5774 - Capítulo 6

Raciocínio Baseado em Regras

João Luís Garcia Rosa¹

¹Departamento de Ciências de Computação
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
Universidade de São Paulo - São Carlos

2020

Sumário

- 1 Baseados em Conhecimento
 - Representação
 - Implicações
 - Encadeamentos
- 2 Progressivo
 - Forma E/OU para Fatos
 - Grafos E/OU
 - Regras
- 3 Regressivo
 - Dualidade
 - Expressão meta
 - Resolvendo regressivamente

Sumário

- 1 Baseados em Conhecimento
 - Representação
 - Implicações
 - Encadeamentos
- 2 Progressivo
 - Forma E/OU para Fatos
 - Grafos E/OU
 - Regras
- 3 Regressivo
 - Dualidade
 - Expressão meta
 - Resolvendo regressivamente

Corpo de Conhecimento

- A forma como um corpo de conhecimento sobre um certo campo é expresso por um especialista deste campo, freqüentemente contém informação importante sobre como esse conhecimento pode ser usado da melhor forma.
- Suponha, por exemplo, que um matemático diga:
“Se X e Y são ambos maiores que zero, o produto de X e Y também é maior que zero.”
- No cálculo de predicados esta sentença ficaria:

$$\forall X \forall Y ((m(X, 0) \wedge m(Y, 0)) \rightarrow m(\text{vezes}(X, Y), 0)). \quad (1)$$

- Entretanto, pode-se usar a seguinte fórmula equivalente:

$$\forall X \forall Y ((m(X, 0) \wedge \neg m(\text{vezes}(X, Y), 0)) \rightarrow \neg m(Y, 0)). \quad (2)$$

Corpo de Conhecimento

- O conteúdo lógico da sentença do matemático é independente das muitas formas equivalentes do cálculo de predicados que poderiam representá-la.
- Mas, na forma que as sentenças do Português são construídas, freqüentemente contêm informação de controle extra-lógica ou heurística.
- No exemplo anterior, a sentença parece indicar que se está habituado ao fato de que se X e Y são individualmente maiores que zero, então é óbvio provar que X multiplicado por Y é maior que zero.

Sumário

1 Baseados em Conhecimento

- Representação
- **Implicações**
- Encadeamentos

2 Progressivo

- Forma E/OU para Fatos
- Grafos E/OU
- Regras

3 Regressivo

- Dualidade
- Expressão meta
- Resolvendo regressivamente

Expressões implicacionais

- Muito do conhecimento usado por sistemas de IA é diretamente representável por expressões gerais de implicação. Veja as seguintes sentenças:

- 1 Todos os vertebrados são animais.

$$\forall X(\text{vertebrado}(X) \rightarrow \text{animal}(X)) \quad (3)$$

- 2 Todos do departamento de computação acima de 30 anos são casados.

$$\forall X \forall Y ((\text{trab}(\text{dc}, X) \wedge \text{idade}(X, Y) \wedge \text{ma}(Y, 30)) \rightarrow \text{casado}(X)) \quad (4)$$

- 3 Existe um cubo acima de todo cilindro vermelho.

$$\forall X ((\text{cilindro}(X) \wedge \text{vermelho}(X)) \rightarrow \exists Y (\text{cubo}(Y) \wedge \text{acima}(Y, X))) \quad (5)$$

Fatos e regras

- O sistema descrito aqui não converte fórmulas em cláusulas; eles as usam numa forma perto da sua forma original dada.
- As fórmulas que representam conhecimento de asserção sobre o problema são separadas em duas categorias: *regras* e *fatos*.
 - As **regras** consistem das asserções dadas na forma implicacional. Tipicamente, expressam conhecimento geral sobre uma área particular e são usadas como regras de produção.
 - Os **fatos** são as asserções que não são expressas como implicações. Tipicamente, representam conhecimento específico relevante a um caso particular.
- A tarefa dos sistemas de produção é provar uma *fórmula meta* a partir destes fatos e regras.

Sumário

1 Baseados em Conhecimento

- Representação
- Implicações
- Encadeamentos

2 Progressivo

- Forma E/OU para Fatos
- Grafos E/OU
- Regras

3 Regressivo

- Dualidade
- Expressão meta
- Resolvendo regressivamente

Encadeamentos lógicos

- Em sistemas por **encadeamento progressivo** (*forward* ou “data-driven”), as implicações usadas como regras-P operam numa base de dados global de fatos até que uma condição de terminação envolvendo a fórmula meta seja alcançada.
- Em sistemas por **encadeamento regressivo** (*backward* ou “goal-driven”) as implicações usadas como regras-R operam numa base de dados global de metas até que uma condição de terminação envolvendo os fatos seja alcançada.
- Combinar operação progressiva e regressiva também é possível.

Sistema de dedução baseado em regras

- Este tipo de sistema de prova de teorema é um **sistema direto** ao contrário do sistema de refutação.
- Um sistema direto não é necessariamente mais eficiente que um sistema de refutação, mas sua operação parece ser intuitivamente mais fácil para as pessoas entenderem.
- Sistemas deste tipo são freqüentemente chamados de *sistemas de dedução baseados em regras*, para enfatizar a importância de se usar regras para fazer deduções.
- A pesquisa em IA tem produzido muitas aplicações de sistemas baseados em regras.

Sumário

- 1 Baseados em Conhecimento
 - Representação
 - Implicações
 - Encadeamentos
- 2 Progressivo
 - Forma E/OU para Fatos
 - Grafos E/OU
 - Regras
- 3 Regressivo
 - Dualidade
 - Expressão meta
 - Resolvendo regressivamente

Forma E/OU

- O sistema progressivo tem como sua base de dados global inicial uma representação para o conjunto de fatos dado.
- Os fatos são representados como fórmulas do cálculo de predicados que foram transformadas em formas livres de implicações chamadas formas E/OU.
- Para converter uma fórmula na forma E/OU, os símbolos “ \rightarrow ” (se existirem) são eliminados, usando a equivalência $W1 \rightarrow W2 \equiv \neg W1 \vee W2$. (Tipicamente, existem poucos símbolos “ \rightarrow ” entre os fatos porque as implicações são preferivelmente representadas como regras.)
- Depois, os símbolos de negação são movidos para dentro (usando as leis de De Morgan) até que seus escopos incluam, no máximo, um único predicado.

Forma E/OU

- A expressão resultante é então *skolemizada* e prenexada; as variáveis dentro dos escopos dos quantificadores universais são padronizadas através da renomeação, as variáveis quantificadas existencialmente são substituídas por funções de Skolem, e os quantificadores universais são eliminados.
- Qualquer variável restante é assumida ter quantificação universal.
- Ou seja, na verdade é aplicado o algoritmo da representação clausal até o passo imediatamente anterior a obtenção da forma normal conjuntiva (passo 8), complementando com a eliminação dos quantificadores universais.

Forma E/OU

- Por exemplo, a expressão fato:

$$\exists U \forall V (q(V, U) \wedge \neg((r(V) \vee p(V)) \wedge s(U, V))) \quad (6)$$

é convertida para

$$q(V, a) \wedge ((\neg r(V) \wedge \neg p(V)) \vee \neg s(a, V)) \quad (7)$$

As variáveis podem ser renomeadas de tal forma que a mesma variável não ocorra em conjunções diferentes (principais) da expressão fato. A renomeação de variáveis neste exemplo leva à expressão:

$$q(W, a) \wedge ((\neg r(V) \wedge \neg p(V)) \vee \neg s(a, V)). \quad (8)$$

Uma expressão na forma E/OU consiste de subexpressões de literais conectados por símbolos “ \wedge ” e “ \vee ”.

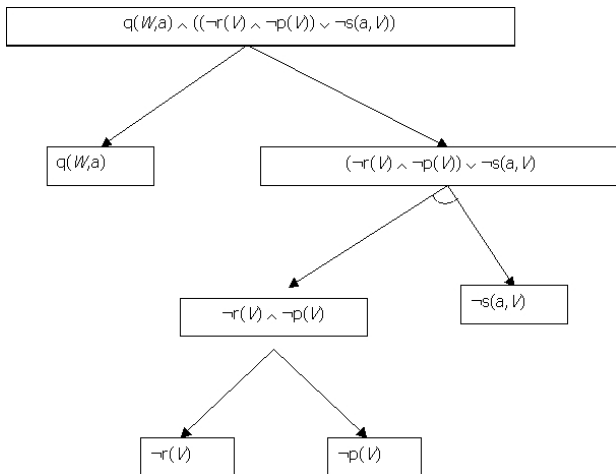
Sumário

- 1 Baseados em Conhecimento
 - Representação
 - Implicações
 - Encadeamentos
- 2 Progressivo
 - Forma E/OU para Fatos
 - Grafos E/OU
 - Regras
- 3 Regressivo
 - Dualidade
 - Expressão meta
 - Resolvendo regressivamente

Grafos E/OU

- Um grafo E/OU pode ser usado para representar uma expressão fato na forma E/OU.
- Por exemplo, a árvore E/OU a seguir representa a expressão fato posta na forma E/OU acima.
- Cada subexpressão da expressão fato é representada por um vértice no grafo.
- As subexpressões relacionadas disjuntivamente, E_1, \dots, E_k , de um fato, $(E_1 \vee \dots \vee E_k)$, são representadas por vértices descendentes conectados a seus vértices pais por um conector- k (que contém um arco de ligação entre os descendentes).
- Cada subexpressão conjuntiva, E_1, \dots, E_n , de uma expressão, $(E_1 \wedge \dots \wedge E_n)$, é representada por um único vértice descendente conectado ao vértice pai por um conector- l .

Grafos E/OU



Grafos E/OU

- Os vértices folhas da representação de grafo E/OU de uma expressão fato estão rotulados pelos literais que ocorrem na expressão.
- O vértice raiz não tem nenhum ancestral no grafo.
- Uma propriedade interessante da representação de grafo E/OU de uma fórmula é que o conjunto de cláusulas no qual a fórmula pode ser convertido, pode ser visto como o conjunto de grafos solução (terminando em vértices folhas) do grafo E/OU.
- Então, as cláusulas que resultam da expressão $q(W, a) \wedge ((\neg r(V) \wedge \neg p(V)) \vee \neg s(a, V))$ são:
 - $q(W, a)$
 - $\neg s(a, V) \neg r(V)$
 - $\neg s(a, V) \neg p(V)$

Sumário

1 Baseados em Conhecimento

- Representação
- Implicações
- Encadeamentos

2 Progressivo

- Forma E/OU para Fatos
- Grafos E/OU
- Regras

3 Regressivo

- Dualidade
- Expressão meta
- Resolvendo regressivamente

Regras e Grafos E/OU

- As regras de produção usadas pelo sistema de produção progressivo são aplicadas a estruturas de grafos E/OU para produzir estruturas de grafos transformadas.
- Estas regras são baseadas em fórmulas implicacionais que representam conhecimento assertional geral sobre um domínio de problema.
- Para simplificar, limitou-se os tipos de fórmulas permitidas como regras àquelas da forma $L \rightarrow W$, onde L é um literal único, W é uma fórmula arbitrária (assumida estar na forma E/OU), e quaisquer variáveis ocorrendo na implicação são assumidas ter quantificação universal sobre a implicação inteira.

Usando fórmula meta para terminação

- O objetivo do sistema de produção progressivo é provar alguma fórmula meta a partir de uma fórmula fato e de um conjunto de regras.
- Este sistema progressivo é limitado em relação ao tipo de expressões metas que ele pode provar; especificamente, ele pode provar apenas as fórmulas metas cuja forma seja uma disjunção de literais.
- Representa-se esta fórmula meta por um conjunto de literais e assume-se que os membros deste conjunto estão relacionados disjuntivamente.
- Os literais metas (assim como as regras) podem ser usados para adicionar descendentes ao grafo E/OU.

Usando fórmula meta para terminação

- Quando um dos literais metas unifica com um literal rotulando um vértice literal, n , do grafo, adiciona-se um novo descendente do vértice n , rotulado pelo literal meta unificado, ao grafo.
- Este descendente é chamado de **vértice meta**.
- Os vértices metas são conectados aos seus pais por arcos de *matching*.
- O sistema de produção termina de forma bem sucedida quando produz um grafo E/OU contendo um grafo solução que termina em vértices metas. (Na terminação, o sistema inferiu uma cláusula idêntica a alguma subparte da cláusula meta.)

Passos do encadeamento progressivo

- Para resolver um problema através do encadeamento progressivo, é necessária a execução de alguns passos:
 - ① Verificar se os elementos estão no formato adequado: o fato deve estar na forma E/OU; as regras devem ter apenas um literal como antecedente e a meta deve ser uma disjunção de literais. Se a meta não obedecer a esta exigência, não é possível resolver através do encadeamento progressivo;
 - ② Construir o grafo E/OU para a expressão fato;
 - ③ Construir o grafo do conhecimento para a expressão fato, aplicando as regras no grafo E/OU;
 - ④ Obter as cláusulas-P a partir do grafo do conhecimento;
 - ⑤ Verificar se a meta foi alcançada a partir do conjunto de cláusulas obtidas. Lembre-se de que este conjunto é uma conjunção de cláusulas-P, ou seja, uma conjunção de disjunções.

Sumário

- 1 Baseados em Conhecimento
 - Representação
 - Implicações
 - Encadeamentos
- 2 Progressivo
 - Forma E/OU para Fatos
 - Grafos E/OU
 - Regras
- 3 **Regressivo**
 - **Dualidade**
 - Expressão meta
 - Resolvendo regressivamente

Regressivo: dual ao progressivo

- Uma propriedade importante da lógica é a dualidade entre asserções e metas em sistemas de prova de teoremas.
- Já foi vista uma instância deste princípio de dualidade nos sistemas de refutação por resolução.
- Lá a fórmula meta era negada, convertida na forma de cláusula, e adicionada às asserções em forma de cláusulas também.
- A dualidade entre asserções e metas permite que a meta negada seja tratada como se fosse uma asserção.
- Os sistemas de refutação por resolução aplicam resolução ao conjunto de cláusulas combinadas até que a cláusula vazia (denotando F) seja produzida.

Regressivo: dual ao progressivo

- Pode-se também imaginar sistemas mistos nos quais três formas diferentes de resolução são usadas, a resolução entre asserções, a resolução entre expressões metas e a resolução entre uma asserção e uma meta.
- O sistema progressivo descrito no último item deveria ser apontado como um destes sistemas mistos porque envolve a unificação de um literal fato no grafo E/OU com um literal meta.
- O sistema de produção regressivo, descrito aqui, é também um sistema misto que é, de alguma forma, **dual** ao sistema progressivo.
- Sua operação envolve os mesmos tipos de representações e mecanismos que são usados no sistema progressivo.

Sumário

- 1 Baseados em Conhecimento
 - Representação
 - Implicações
 - Encadeamentos
- 2 Progressivo
 - Forma E/OU para Fatos
 - Grafos E/OU
 - Regras
- 3 **Regressivo**
 - Dualidade
 - **Expressão meta**
 - Resolvendo regressivamente

Fórmula meta na forma E/OU

- O sistema regressivo é capaz de tratar de expressões metas de forma arbitrária.
- Primeiro, converte-se a fórmula meta na forma E/OU pelo mesmo tipo de processo usado para converter uma expressão fato:
 - elimina-se os símbolos \rightarrow ,
 - move-se os símbolos de negação para dentro,
 - skolemiza-se as variáveis *universais*, e no final
 - elimina-se os quantificadores existenciais.
- As variáveis restantes na forma E/OU de uma expressão meta têm assumida a quantificação existencial.

Fórmula meta na forma E/OU

- Por exemplo, a expressão meta:

$$\exists Y \forall X (p(X) \rightarrow (q(X, Y) \wedge \neg(r(X) \wedge s(Y)))) \quad (9)$$

é convertida para

$$\neg p(f(Y)) \vee (q(f(Y), Y) \wedge (\neg r(f(Y)) \vee \neg s(Y))), \quad (10)$$

onde $f(Y)$ é uma função de Skolem. A padronização das variáveis nas disjunções (principais) da meta leva a:

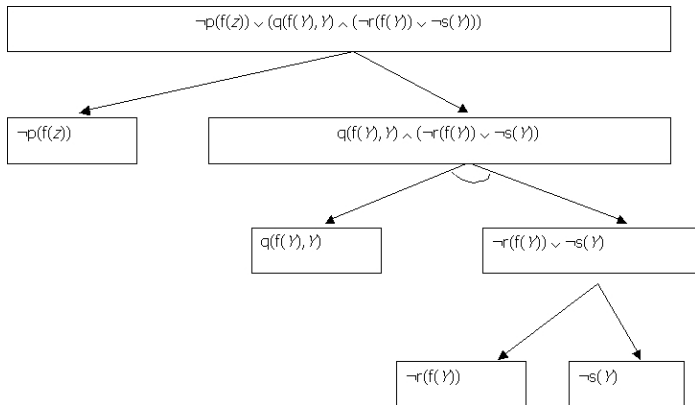
$$\neg p(f(Z)) \vee (q(f(Y), Y) \wedge (\neg r(f(Y)) \vee \neg s(Y))). \quad (11)$$

(Note que a variável Y não pode ser renomeada dentro da subexpressão disjuntiva.)

Fórmula meta como grafo E/OU

- As fórmulas metas na forma E/OU podem ser representadas como grafos E/OU.
- Mas com expressões metas, os conectores- k nestes grafos são usados para separar *conjuntivamente* subexpressões relacionadas.
- A representação do grafo E/OU para a fórmula meta exemplo acima é mostrada na próxima figura.
- Os vértices folhas deste grafo são rotulados pelos literais da expressão meta.
- Nos grafos metas E/OU, chama-se qualquer descendente do vértice raiz de vértice submeta.
- As expressões que rotulam tais vértices descendentes são chamadas de submetas.

Expressão meta na forma E/OU



Cláusulas metas

- O conjunto de cláusulas na representação de forma de cláusula desta fórmula meta pode ser lida a partir do conjunto de grafos solução terminando em vértices folhas:
 - $\neg p(f(z))$
 - $q(f(Y), Y) \wedge \neg r(f(Y))$
 - $q(f(Y), Y) \wedge \neg s(Y)$
- As cláusulas metas são *conjunções* de literais e a disjunção destas cláusulas é a forma de cláusula da fórmula meta.

Aplicando regras no sentido regressivo

- As regras-R para este sistema são baseadas em implicações assercionais.
- Elas são asserções assim como são as regras-P no sistema progressivo.
- Agora, entretanto, vai-se restringir as regras-R a expressões da forma $W \rightarrow L$, onde W é qualquer fórmula (assumida estar na forma E/OU), L é um literal, e o escopo da quantificação de quaisquer variáveis na implicação é a implicação inteira.
- Novamente, a restrição de regras-R a implicações desta forma simplifica a unificação e não causa dificuldades práticas importantes.
- Também, uma implicação tal como $W \rightarrow (L1 \wedge L2)$ pode ser convertida a duas regras $W \rightarrow L1$ e $W \rightarrow L2$.

Aplicando regras no sentido regressivo

- Tal regra-R é aplicável a um grafo E/OU representando uma fórmula meta se esse grafo contém um vértice literal rotulado por L' que unifica com L .
- O resultado da aplicação da regra é adicionar um arco de *matching* a partir do vértice rotulado por L' para um vértice do novo descendente rotulado por L .
- Este novo vértice é o vértice raiz da representação do grafo E/OU de Wu onde u é o u.m.g. de L e L' .
- Este u.m.g. rotula o arco de *matching* no grafo transformado.

A condição de terminação

- As expressões fatos usadas pelo sistema regressivo são limitadas àquelas na forma de uma conjunção de literais.
- Tais expressões podem ser representadas como um conjunto de literais.
- Análogo ao sistema progressivo, quando um literal fato unifica com um literal rotulando um vértice literal do grafo, um descendente correspondente vértice fato pode ser adicionado ao grafo.
- Este vértice fato é ligado ao vértice literal da submeta unificada por um arco de *matching* rotulado pelo u.m.g..

A condição de terminação

- O mesmo literal fato pode ser usado várias vezes (com variáveis diferentes em cada uso) para criar vértices fatos múltiplos.
- A condição para terminação bem sucedida para o sistema regressivo é que o grafo E/OU contenha um grafo de solução consistente terminando em vértices fatos.
- Novamente, um grafo de solução consistente é aquele onde as substituições do arco de *matching* têm uma composição unificadora.

Passos do encadeamento regressivo

- Para resolver um problema através do encadeamento regressivo, é necessária a execução de alguns passos:
 - ① Verificar se os elementos estão no formato adequado: a meta deve estar na forma E/OU; as regras devem ter apenas um literal como conseqüente e o fato deve ser uma conjunção de literais. Se o fato não obedecer a esta exigência, não é possível resolver através do encadeamento regressivo;
 - ② Construir o grafo E/OU para a expressão meta;
 - ③ Construir o grafo do conhecimento para a expressão meta, aplicando as regras no grafo E/OU;
 - ④ Obter as cláusulas-R a partir do grafo do conhecimento;
 - ⑤ Verificar se o fato pode ser verificado a partir do conjunto de cláusulas obtidas. Lembre-se de que este conjunto é uma disjunção de cláusulas-R, ou seja, uma disjunção de conjunções.

Sumário

- 1 Baseados em Conhecimento
 - Representação
 - Implicações
 - Encadeamentos
- 2 Progressivo
 - Forma E/OU para Fatos
 - Grafos E/OU
 - Regras
- 3 **Regressivo**
 - Dualidade
 - Expressão meta
 - **Resolvendo regressivamente**

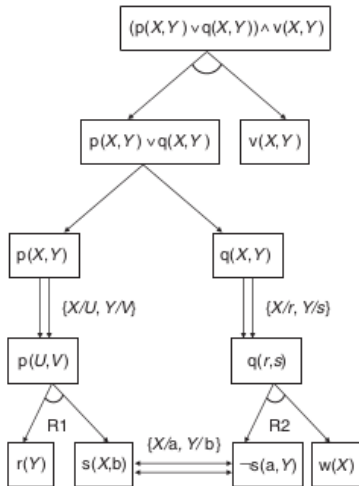
Resolvendo dentro do grafo E/OU

- O sistema regressivo descrito não é capaz de provar expressões de metas válidas ou tautológicas como $(\neg p \vee p)$ a menos que ele possa provar $\neg p$ ou p separadamente.
- O sistema progressivo não pode reconhecer expressões fatos contraditórias como $(\neg p \wedge p)$.
- Com a finalidade de superar estas deficiências, os sistemas devem ser capazes de realizar inferências intrameta ou intrafato.
- Vai-se descrever como certas inferências intrameta podem ser realizadas.
- Considere, por exemplo, as seguintes expressões usadas num sistema regressivo:

Resolvendo dentro do grafo E/OU

- Meta: $(p(X, Y) \vee q(X, Y)) \wedge v(X, Y)$
 - Regras:
 - R1: $(r(V) \wedge s(U, b)) \rightarrow p(U, V)$
 - R2: $(\neg s(a, S) \wedge w(R)) \rightarrow q(R, S)$
 - Fatos: $r(b) \wedge w(b) \wedge v(a, b) \wedge v(b, b)$
-
- Depois de aplicar as regras R1 e R2, tem-se o grafo E/OU mostrado na próxima figura.
 - Este grafo tem dois literais complementares cujos predicados unificam com u.m.g. $\{X/a, Y/b\}$.

Expressão meta na forma E/OU



Resolvendo dentro do grafo E/OU

- O procedimento Resolução de Meta Restrita (“RGR” - *Restricted Goal Resolution*) permite eliminar vértices folha complementares numa disjunção, para efeito de simplificação do grafo E/OU.
- Um outro procedimento possível, caso o grafo gerado não resolva o problema, é gerar um outro grafo, partindo da expressão obtida através da aplicação da propriedade distributiva.

Uma Combinação de Progressivo e Regressivo

- Ambos os sistemas de dedução baseados em regras, progressivo e regressivo, têm limitações.
- O sistema regressivo pode manipular expressões metas de forma arbitrária mas está restrito a expressões fatos consistindo de conjunções de literais.
- O sistema progressivo pode manipular expressões fatos de forma arbitrária mas está restrito a expressões metas consistindo de disjunções de literais.
- Pode-se combinar os dois sistemas e tirar vantagens de cada um sem as limitações de ambos?

Uma Combinação de Progressivo e Regressivo

- Quatro fatores influenciam a razão de se escolher raciocinar progressivamente ou regressivamente [3]:
 - ① Existem mais estados iniciais ou metas?
 - É preferível mover de um conjunto de estados menor para um maior (e portanto mais fácil de achar).
 - ② Em qual direção o fator de ramificação é maior?
 - (fator de ramificação é o nro médio de vértices que podem ser alcançados diretamente de um único vértice.) É melhor mover na direção com o fator de ramificação menor.
 - ③ O programa terá que justificar seu processo de raciocínio para o usuário?
 - Se tiver, é importante mover na direção que corresponde à forma como o usuário está pensando.
 - ④ Que tipo de evento irá iniciar um episódio de resolução de problema?
 - Se for a chegada de um novo fato, o raciocínio progressivo faz sentido. Se for desejada a resposta de uma pergunta, o raciocínio regressivo é mais natural.

Referências I

- [1] Casanova, M. A., Giorno, F. A. C., Furtado, A. L.
Programação em Lógica e a Linguagem Prolog.
Ed. Edgard Blücher Ltda., 1987
- [2] Nilsson, N. J.
Principles of Artificial Intelligence.
Springer-Verlag; 1982.
- [3] Rich, E. and Knight, K.
Artificial Intelligence - 2nd. Edition.
McGraw-Hill, 1991
- [4] Rosa, J. L. G.
Fundamentos da Inteligência Artificial.
Editora LTC. Rio de Janeiro, 2011.