DCC638 - Introdução à Lógica Computacional
2023.2

Os Fundamentos: Lógica de Predicados

Área de Teoria DCC/UFMG

Introdução

Lógica de predicados: Introdução

- A lógica proposicional cobre a análise de proposições compostas (fórmulas), i.e., proposições simples ligadas por conectivos $\neg$, $\wedge$, $\vee$, $\rightarrow$, $\leftrightarrow$, ...

- Entretanto, a lógica proposicional não é expressiva o suficiente para capturar certas sentenças.

- Por exemplo, suponha que saibamos que

  1. "*Todos os matriculados em Introdução à Lógica Computacional são estudantes dedicados*", e que

  2. "*Túrin está matriculado em Introdução à Lógica Computacional*".

  Intuitivamente, podemos, então, concluir que

  3. "*Túrin é um estudante dedicado.*"

  Pare este tipo de inferência precisaremos introduzir os conceitos de predicados e quantificadores.

Predicados

Predicados: Introdução

- Afirmações como as seguintes são comuns em matemática:
  1. $x \geq 12 \wedge x < 64$,
  2. $x + y = z$,
  3. O aluno x tirou a maior nota da sala na prova.
- Tais afirmações são escritas em termos de <u>variáveis</u>.

  A menos que os valores das variáveis sejam especificados, as afirmações não são verdadeiras nem falsas.
- Diferentemente de lógica proposicional, o valor de verdade das sentenças acima depende de mais do que das proposições e dos conectivos lógicos.

Predicados: Introdução

- $\boxed{\text{Exemplo 1}}$ A afirmação

  "x é um número real"

  pode ser dividida em duas partes:

  1. a primeira parte, a **variável** x, é o sujeito da afirmação,
  2. a segunda parte "é um número real" é um **predicado**, ou seja, uma propriedade que o sujeito da afirmação pode ou não satisfazer.

  A afirmação *"x é um número real"* pode ter valores de verdade diferentes dependendo do valor que a variável x assumir.

  - Quando $x = \pi$, a afirmação *"x é um número real"* é verdadeira.
  - Quando $x = \sqrt{-2}$, a afirmação *"x é um número real"* é falsa.

Predicados: Introdução

- $\boxed{\text{Exemplo 1}}$ (Continuação)

  Podemos ver esta afirmação como uma **função proposicional**

  $$P(x)\text{: } \textit{“x é um número real”}$$

  que mapeia valores de x para valores de verdade (verdadeiro ou falso):

  - $P(\pi) = T$.
  - $P(\sqrt{-2}) = F$.

Predicados

- Um **predicado** é uma sentença com um número finito de variáveis cujo valor de verdade pode ser determinado quando as variáveis são substituídas por valores específicos.

  Intuitivamente, predicados:

  - dão qualidades a sujeitos,
  - relacionam sujeitos entre si, ou
  - relacionam sujeitos a objetos.

- A aridade de predicados depende do número argumentos que ele toma.

  Um predicado

  $$P(x_1, x_2, \ldots, x_n)$$

  de n argumentos é chamado de um **predicado n-ário**.

Predicados

- $\boxed{\text{Exemplo 2}}$ Seja $P(x)$ o predicado unário "$x \geq 10$".
  - $P(15) = T$,

    pois substituindo x por 15 em "$x \geq 10$", obtemos uma afirmação verdadeira.
  - $P(\pi) = F$,

    pois substituindo x por π em "$x \geq 10$", obtemos uma afirmação falsa.

Predicados

- $\boxed{\text{Exemplo 2}}$ Seja $P(x)$ o predicado unário *"$x \geq 10$"*.
  - $P(15) = T$,

    pois substituindo x por 15 em *"$x \geq 10$"*, obtemos uma afirmação <u>verdadeira</u>.
  - $P(\pi) = F$,

    pois substituindo x por π em *"$x \geq 10$"*, obtemos uma afirmação <u>falsa</u>.

- $\boxed{\text{Exemplo 3}}$ Seja $C(x, y)$ o predicado binário *"x é capital de y"*.
  - $C(\texttt{Brasília}, \texttt{Brasil}) = T$,

    pois substituindo x por `Brasília` e y por `Brasil` em *"x é capital de y"*, obtemos uma afirmação <u>verdadeira</u>.
  - $C(\texttt{Paris}, \texttt{Inglaterra}) = F$,

    pois substituindo x por `Paris` e y por `Inglaterra` em *"x é capital de y"*, obtemos uma afirmação <u>falsa</u>.

Predicados

- $\boxed{\text{Exemplo 4}}$ Seja $S(x, y, z)$ o predicado ternário *"$x + y = z$"*.
  - $S(1, 4, 5) = T$,

    pois substituindo x por 1, y por 4 e z por 5 em *"$x + y = z$"*, obtemos uma afirmação verdadeira.
  - $S(4, 5, 1) = F$,

    pois substituindo x por 4, y por 5 e z por 1 em *"$x + y = z$"*, obtemos uma afirmação falsa.
  - $S(0, 0, 0) = T$,

    pois substituindo x por 0, y por 0 e z por 0 em *"$x + y = z$"*, obtemos uma afirmação verdadeira.

Quantificadores: Introdução

- Para atribuir um valor de verdade a um predicado podemos:

  1. atribuir valores específicos para todas variáveis (como fizemos até agora), ou

  2. *quantificar* em qual faixa de valores de x a sentença pode ser considerada verdadeira.

     Em português, usamos palavras como "*nenhum*", "*todos*" e "*algum*" para quantificar predicados.

     Por exemplo, o predicado

     "O computador x do laboratório está ligado"

     não tem valor de verdade em si, mas as seguintes sentenças têm:

     1. *"<u>Nenhum</u> computador do laboratório está ligado."*
     2. *"<u>Todos</u> os computadores do laboratório estão ligados."*
     3. *"<u>Algum</u> computador do laboratório está ligado."*

Quantificadores: Domínio ou universo de discurso

- Dado um predicado de várias variáveis, o **domínio de discurso**, ou **universo de discurso**, ou simplesmente **domínio** é o conjunto de valores que as variáveis podem, em princípio, assumir.

  1. No predicado

     $$\text{“}x \geq 2\text{”},$$

     o domínio de discurso pode ser o conjunto dos reais $\mathbb{R}$ ou o dos inteiros $\mathbb{Z}$.

  2. No predicado

     “A pessoa x nasceu no país y”,

     o domínio de x pode ser o conjunto de todas as pessoas, e o domínio de y pode ser o conjunto de países no mundo.

- O domínio de um predicado é essencial para determinarmos a quantificação.

Quantificador universal

- Dado um predicado $P(x)$, sua **quantificação universal** é

$$\forall x.\, P(x)$$

significando

"Para todos os valores x no domínio, $P(x)$ é verdadeiro"

ou simplesmente

"Para todo x no domínio, $P(x)$"

- O símbolo $\forall$ é o símbolo de **quantificador universal**.
- A sentença $\forall x.\, P(x)$ é
  - <u>verdadeira</u> se $P(x)$ é verdadeiro para todo x no domínio,
  - <u>falsa</u> se há algum x no domínio tal que $P(x)$ seja falso.

    Um elemento x tal que $P(x) = F$ é um **contra-exemplo** para $\forall x.\, P(x)$.

Quantificação universal

- $\boxed{\text{Exemplo 5}}$ Considere o universo de discurso $D = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. A sentença

$$\forall x.\, x^2 \geq x$$

é verdadeira ou falsa?

Quantificação universal

- $\boxed{\text{Exemplo 5}}$ Considere o universo de discurso $D = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. A sentença

$$\forall x.\, x^2 \geq x$$

é verdadeira ou falsa?

Solução.

Temos que

$$1^2 \geq 1, \quad 2^2 \geq 2, \quad 3^2 \geq 3, \quad 4^2 \geq 4, \text{ e } \quad 5^2 \geq 5.$$

Portanto temos que $P(1)$, $P(2)$, $P(3)$, $P(4)$ e $P(5)$ são todos verdadeiros, e a sentença universal é, consequentemente, também verdadeira.

Quantificação universal

- É possível definir o universo de discurso já na sentença quantificada:
  1. $\forall x \in \mathbb{R}.\ x + 1 > x$ estabelece como universo de discurso os números reais.
  2. $\forall y \in \mathbb{Z}^+.\ -y \leq -5$ estabelece como universo de discurso os inteiros positivos.
- $\boxed{\text{Exemplo 6}}$ A sentença

$$\forall x \in \mathbb{R}.\ x^2 \geq x$$

é verdadeira ou falsa?

Quantificação universal

- É possível definir o universo de discurso já na sentença quantificada:
  1. $\forall x \in \mathbb{R}.\ x + 1 > x$ estabelece como universo de discurso os números reais.
  2. $\forall y \in \mathbb{Z}^+.\ -y \leq -5$ estabelece como universo de discurso os inteiros positivos.
- $\boxed{\text{Exemplo 6}}$ A sentença

$$\forall x \in \mathbb{R}.\ x^2 \geq x$$

é verdadeira ou falsa?

Solução.

Temos o contra-exemplo

$$(1/2)^2 = 1/4 \not\geq 1/2,$$

logo $P(1/2)$ é falso e, consequentemente, a sentença universal é falsa.

Quantificação existencial

- Dado um predicado $P(x)$, sua **quantificação existencial** é

$$\exists x.\, P(x)$$

  significando

  "Existe um valor de x no domínio tal que $P(x)$ é verdadeiro"

  ou simplesmente

  "Existe x no domínio tal que $P(x)$"

- O símbolo $\exists$ é o símbolo de **quantificador existencial**.
- A sentença $\exists x.\, P(x)$ é
  - <u>verdadeira</u> se $P(x)$ é verdadeiro para ao menos um x no domínio,
  - <u>falsa</u> se para todo x no domínio $P(x)$ é falso.

  Um elemento x tal que $P(x) = T$ é uma **testemunha** de $\exists x.\, P(x)$.

Quantificação existencial

- $\boxed{\text{Exemplo 7}}$ Seja $D = \{5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ o universo de discurso. A sentença

$$\exists m.\ m^2 = m$$

é verdadeira ou falsa?

- $\boxed{\text{Exemplo 7}}$ Seja $D = \{5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ o universo de discurso. A sentença

$$\exists m.\ m^2 = m$$

é verdadeira ou falsa?

Solução.

Analisando todos os casos, obtemos

$$5^2 = 25 \neq 5, \qquad 6^2 = 36 \neq 6, \qquad 7^2 = 49 \neq 7,$$

$$8^2 = 64 \neq 8, \qquad 9^2 = 81 \neq 9, \text{ e } \qquad 10^2 = 100 \neq 10.$$

Portanto a setença existencial é falsa.

Quantificação existencial

- $\boxed{\text{Exemplo 8}}$ Seja $\mathbb{Z}$ o universo de discurso. A setença

$$\exists m.\ m^2 = m$$

é verdadeira ou falsa?

Quantificação existencial

- $\boxed{\text{Exemplo 8}}$ Seja $\mathbb{Z}$ o universo de discurso. A setença

  $$\exists m.\ m^2 = m$$

  é verdadeira ou falsa?

  Solução.

  Temos que $1^2 = 1$, logo 1 é uma testemunha de que $m^2 = m$ para pelo menos um inteiro m.

  Portanto a sentença existencial é verdadeira.

- Note que nos dois exemplos anteriores o predicado usado foi o mesmo ($\exists m.\ m^2 = m$), mas a alteração do universo de discurso fez com que uma sentença quantificada fosse falsa (quando $m \in \{5, 6, 7, 8, 9, 10\}$) , enquanto a outra fosse verdadeira (quando $m \in \mathbb{Z}$).

Quantificação sobre domínios finitos

- Quando o domínio de um quantificador é finito, podemos remover os quantificadores universal ou existencial.
- A sentença universal em um domínio finito $D = \{d_1, d_2, \ldots, d_n\}$ é verdadeira sse $P(x)$ é verdadeiro para todo $x \in D$:

$$\forall x.\, P(x) \qquad \equiv \qquad P(d_1) \land P(d_2) \cdots \land P(d_n).$$

- A sentença existencial em um domínio finito $D = \{d_1, d_2, \ldots, d_n\}$ é verdadeira sse $P(x)$ é verdadeiro para pelo menos um $x \in D$:

$$\exists x.\, P(x) \qquad \equiv \qquad P(d_1) \lor P(d_2) \cdots \lor P(d_n).$$

Ordem de precedência dos quantificadores

- Os quantificadores $\forall$ e $\exists$ têm precedência sobre todos os conectivos lógicos ($\neg$, $\wedge$, $\vee$, $\rightarrow$, $\leftrightarrow$, $\ldots$).

  Por exemplo:

  1. A sentença

     $$\forall x.\ P(x) \vee Q(x)$$

     significa

     $$(\,\forall x.\ P(x)\,) \ \vee \ Q(x).$$

     Note que a sentença <u>não significa</u>

     $$\forall x.\,(\,P(x) \vee Q(x)\,).$$

     Use parênteses com cuidado para expressar o que realmente você quer!

Quantificadores: Variáveis ligadas e escopo

- Quando um quantificador é utilizado em uma variável x, dizemos que x é uma **variável ligada**.

  Uma variável que não é ligada a nenhum quantificador é chamada de **variável livre**.

  1. Em

  $$\forall x.\, x + y = 2,$$

  x é uma variável ligada, e y é uma variável livre.

- Os nomes das variáveis ligadas de uma expressão quantificada podem ser mudados sem alterar o valor da expressão.

  1. A expressão

  $$\exists x.\, x + 1 \neq x \quad \text{equivale a} \quad \exists y.\, y + 1 \neq y \quad \text{e a} \quad \exists num.\, num + 1 \neq num.$$

Quantificadores: Variáveis ligadas e escopo

- Cada quantificador tem um **escopo** sobre o qual ele vale.

1. Em

$$\exists x.\,(\,P(x) \land Q(x)\,) \quad \lor \quad \forall x.\,R(x)$$

todas as variáveis são ligadas, mas o escopo de cada x é diferente.

O primeiro quantificador, $\exists x$, tem como escopo apenas

$$(\,P(x) \land Q(x)\,).$$

O segundo quantificador, $\forall x$, tem como escopo apenas

$$R(x).$$

Podemos renomear variáveis ligadas em escopos diferentes sem alterar a expressão lógica (o que muitas vezes torna a expressão mais fácil de ser lida):

$$\exists x.\,(\,P(x) \land Q(x)\,) \quad \lor \quad \forall y.\,R(y)$$

Equivalências lógicas envolvendo quantificadores

- Afirmações envolvendo predicados são logicamente equivalentes se, e somente se, elas têm o mesmo valor de verdade independentemente de quais predicados e domínios de discurso são utilizados.

  Usamos

  $$S \equiv T$$

  para denotar que S e T são equivalentes.

Negando expressões quantificadas

- A negação de expressões quantificadas é dada por equivalências conhecidas como **leis de De Morgan**:

Leis de De Morgan para quantificadores
$\neg\forall x.\, P(x) \;\equiv\; \exists x.\, \neg P(x)$
$\neg\exists x.\, P(x) \;\equiv\; \forall x.\, \neg P(x)$

- Equivalências que seguem das leis de De Morgan são:

Outras equivalências de negação
$\forall x.\, P(x) \;\equiv\; \neg\exists x.\, \neg P(x)$
$\exists x.\, P(x) \;\equiv\; \neg\forall x.\, \neg P(x)$

Negando expressões quantificadas universalmente

- $\boxed{\text{Exemplo 9}}$

$$P: \quad \forall x \in \mathbb{R}.\, x^2 \geq 0$$

$$\neg P: \quad \neg\forall x \in \mathbb{R}.\, x^2 \geq 0 \quad \equiv \quad \exists x \in \mathbb{R}.\, \neg(x^2 \geq 0) \quad \equiv \quad \exists x \in \mathbb{R}.\, x^2 < 0$$

- $\boxed{\text{Exemplo 10}}$

P : *"Todos os programas de computador são finitos."*

$\neg P$: *"Nem todos os programas de computador que são finitos."* $\equiv$
"Existe um programa de computador que não é finito."

- $\boxed{\text{Exemplo 11}}$

P : *"Todo mundo gosta de sorvete ou de bolo."*

$\neg P$: *"Nem todo mundo gosta de sorvete ou de bolo."* $\equiv$
"Existe uma pessoa que não gosta de sorvete nem de bolo."

Negando expressões quantificadas existencialmente

- $\boxed{\text{Exemplo 12}}$

$$P: \quad \exists x \in \mathbb{N}.\, x^2 = x$$

$$\neg P: \quad \neg\exists x \in \mathbb{N}.\, x^2 = x \quad \equiv \quad \forall x \in \mathbb{N}.\, \neg(x^2 = x) \quad \equiv \quad \forall x \in \mathbb{N}.\, x^2 \neq x$$

- $\boxed{\text{Exemplo 13}}$

P : *"Alguns peixes respiram ar."*

$\neg P$: *"Nenhum peixe respira ar."*

- $\boxed{\text{Exemplo 14}}$

P : *"Alguns esportistas são brasileiros e jovens."*

$\neg P$: *"Nenhum esportista é brasileiro e jovem."* $\equiv$
"Todo esportista não é brasileiro ou não é jovem."

Traduzindo de linguagem natural para expressões lógicas

- $\boxed{\text{Exemplo 15}}$ Expresse como expressões quantificadas as seguintes afirmações em linguagem natural:
  - *"Nenhuma arara é pequena."*
  - *"Araras são coloridas e grandes."*
  - *"Existe uma arara que não é colorida, nem pequena."*

Traduzindo de linguagem natural para expressões lógicas

- $\boxed{\text{Exemplo 15}}$ Expresse como expressões quantificadas as seguintes afirmações em linguagem natural:
  - *"Nenhuma arara é pequena."*
  - *"Araras são coloridas e grandes."*
  - *"Existe uma arara que não é colorida, nem pequena."*

Solução.

Primeiro tomamos como universo de discurso o conjunto de todos os animais, então definimos os seguintes predicados:

$$\begin{aligned} A(x) &: \quad \text{“}x \text{ é uma arara”} \\ C(x) &: \quad \text{“}x \text{ é colorido”} \\ P(x) &: \quad \text{“}x \text{ é pequeno”} \end{aligned}$$

Traduzindo de linguagem natural para expressões lógicas

- $\boxed{\text{Exemplo 15}}$ (Continuação)

  Assim podemos traduzir as sentenças para linguagem formal como abaixo.

  (Neste problema, assumimos que tudo que não é pequeno é grande, sem meio termo.)

  - *"Nenhuma arara é pequena"*:

    $$\neg\exists x.\,(\,A(x)\;\land\;P(x)\,)$$

    Forma equivalente:

    $$\forall x.\,(\,A(x)\;\rightarrow\;\neg P(x)\,)$$

Traduzindo de linguagem natural para expressões lógicas

- $\boxed{\text{Exemplo 15}}$ (Continuação)

  - *"Araras são coloridas e grandes"*:

$$\forall x.\,(\ A(x)\ \rightarrow\ C(x) \land \neg P(x)\ )$$

  - *"Existe uma arara que não é colorida, nem pequena"*:

$$\exists x.\,(\,A(x) \land \neg C(x) \land \neg P(x)\,)$$

- $\boxed{\text{Exemplo 16}}$ Encontre uma forma equivalente para as duas últimas expressões quantificadas do exemplo anterior, trocando o quantificador existencial pelo universal e vice-versa. (Note que você pode usar a negação de quantificadores sempre que necessário.)

  Solução. Exercício para o(a) estudante!

Quantificadores aninhados

Quantificadores aninhados: Introdução

- Muitas expressões usam múltiplos **quantificadores aninhados**.

  Por exemplo, no universo de discurso dos números reais, temos o seguinte.

  1. A expressão

     $$\forall x. \forall y. \, (\, (x > 0) \land (y < 0) \;\rightarrow\; (xy < 0)\,)$$

     significa

     "O produto de quaisquer dois reais de sinais opostos é um real negativo."

  2. A expressão

     $$\forall x. \exists y. \, (x + y = 0)$$

     significa

     *"Todo número real tem um número real oposto
     (isto é, que somado ao original resulta em zero)."*

Entendendo quantificadores aninhados

- $\boxed{\text{Exemplo 17}}$ Seja o seguinte predicado sobre o domínio de todas as pessoas:

$$A(x, y) : \quad \text{“}\textit{A pessoa } x \textit{ ama a pessoa } y\text{”}$$

  - $\forall x.\, \exists y.\, A(x, y)$ significa *“Todo mundo ama alguém.”*
  - $\exists y.\, \forall x.\, A(x, y)$ significa *“Existe alguém que é amado por todo mundo.”*
  - $\forall y.\, \exists x.\, A(x, y)$ significa *“Todo mundo é amado por alguém.”*
  - $\exists x.\, \forall y.\, A(x, y)$ significa *“Existe alguém que ama todo mundo.”*

A ordem dos quantificadores

- $\boxed{\text{Exemplo 18}}$ Seja o universo de discurso o conjunto dos números reais. Para cada sentença, diga o que ela significa em linguagem natural e se ela é verdadeira ou falsa.
  - $\forall x.\, \exists y.\, x < y$ significa

A ordem dos quantificadores

- $\boxed{\text{Exemplo 18}}$ Seja o universo de discurso o conjunto dos números reais. Para cada sentença, diga o que ela significa em linguagem natural e se ela é verdadeira ou falsa.

  - $\forall x.\, \exists y.\, x < y$ significa

    "Para todo número real x, existe outro real maior que x."

    Esta sentença é <u>verdadeira</u>.

  - $\exists y.\, \forall x.\, x < y$ significa

A ordem dos quantificadores

- $\boxed{\text{Exemplo 18}}$ Seja o universo de discurso o conjunto dos números reais. Para cada sentença, diga o que ela significa em linguagem natural e se ela é verdadeira ou falsa.

  - $\forall x.\, \exists y.\, x < y$ significa

    "Para todo número real x, existe outro real maior que x."

    Esta sentença é <u>verdadeira</u>.

  - $\exists y.\, \forall x.\, x < y$ significa

    "Existe um número real que é maior que todos os demais números reais."

    Esta sentença é <u>falsa</u>.

  As sentenças do exemplo anterior não são equivalentes logicamente.

  <u>Em geral, ao se trocar a ordem de quantificadores de tipo diferente, o sentido da sentença se altera.</u>

Quantificação sobre duas variáveis

- Quantificadores podem ser aninhados em vários níveis.

  Em particular, é comum encontrar quantificadores aninhados em dois níveis.

Afirmação	**Quando é verdadeira?**	**Quando é falsa?**
$\forall x. \forall y. P(x,y)$ $\forall y. \forall x. P(x,y)$	$P(x,y)$ é verdadeiro para todo par x, y.	Existe um par x, y tal que $P(x,y)$ é falso.
$\forall x. \exists y. P(x,y)$	Para todo x existe um y tal que $P(x,y)$ é verdadeiro.	Existe um x tal que $P(x,y)$ é falso para todo y.
$\exists x. \forall y. P(x,y)$	Existe um x tal que $P(x,y)$ é verdadeiro para todo y.	Para todo x existe um y tal que $P(x,y)$ é falso.
$\exists x. \exists y. P(x,y)$ $\exists y. \exists x. P(x,y)$	Exite um par x, y tal que $P(x,y)$ é verdadeiro.	$P(x,y)$ é falso para todo par x, y.

De sentenças quantificadas para linguagem natural

- $\boxed{\text{Exemplo 19}}$ Sejam os seguintes predicados sobre o domínio de estudantes:

$$C(x): \quad \text{“}x \textit{ tem um computador}\text{”}$$

$$F(x, y): \quad \text{“}x \textit{ e } y \textit{ são amigos}\text{”}$$

  - $\forall x.\,(\ C(x) \lor \exists y.\,(\,C(y) \land F(x, y)\,)\ )$ significa

    “Todo estudante tem um computador, ou tem um amigo que tenha um computador.”

  - $\exists x.\,\forall y.\,\forall z.\,(\ F(x, y) \land F(x, z) \land (y \neq z) \ \rightarrow\ \neg F(y, z)\ )$ significa

    “Existe um estudante cujos amigos não são amigos entre si.”

De linguagem natural para sentenças lógicas

- $\boxed{\text{Exemplo 20}}$ Expresse como expressões quantificadas as seguintes afirmações em linguagem natural, considerando que estamos falando apenas de estudantes da universidade:
  - *"Todo estudante tem um amigo que não sabe dirigir."*
  - *"Há um estudante que não sabe dirigir e que não tem nenhum amigo que saiba."*
  - *"Cada estudante tem exatamente um amigo que não sabe dirigir."*

- $\boxed{\text{Exemplo 20}}$ Expresse como expressões quantificadas as seguintes afirmações em linguagem natural, considerando que estamos falando apenas de estudantes da universidade:
    - *"Todo estudante tem um amigo que não sabe dirigir."*
    - *"Há um estudante que não sabe dirigir e que não tem nenhum amigo que saiba."*
    - *"Cada estudante tem exatamente um amigo que não sabe dirigir."*

Solução.

Primeiro definimos os seguintes predicados sobre o universo de todos os estudantes da universidade:

$$D(x): \quad \text{“}x \textit{ sabe dirigir”}$$

$$A(x, y): \quad \text{“}x \textit{ e } y \textit{ são amigos”}$$

Assim podemos traduzir as sentenças para linguagem formal como a seguir.

De linguagem natural para sentenças lógicas

- Exemplo 20 (Continuação)

  1. *"Todo estudante tem um amigo que não sabe dirigir"*:

  $$\forall x.\, \exists y.\, (\, A(x,y) \wedge \neg D(y)\,)$$

  2. *"Há um estudante que não sabe dirigir e não tem nenhum amigo que saiba"*:

  $$\exists x.\, (\, \neg D(x) \;\wedge\; \forall y.\, (\, A(x,y) \rightarrow \neg D(y)\,)\,)$$

  3. *"Cada estudante tem exatamente um amigo que não sabe dirigir"*:

  $$\forall x.\, \exists y.\, (\; A(x,y) \;\wedge\; \neg D(y) \;\wedge\; \forall z.\, (\, A(x,z) \wedge \neg D(z) \;\rightarrow\; y = z\,)\;)$$

  ou, de forma equivalente:

  $$\forall x.\, \exists y.\, (\; A(x,y) \;\wedge\; \neg D(y) \;\wedge\; \forall z.\, (\, A(x,z) \wedge y \neq z \;\rightarrow\; D(z)\,)\;)$$

Negação de quantificadores aninhados

- A negação de quantificadores aninhados usa as mesmas leis de De Morgan para negação de quantificadores.

Leis de De Morgan para negação
$\neg \forall x.\, P(x) \equiv \exists x.\, \neg P(x)$
$\neg \exists x.\, P(x) \equiv \forall x.\, \neg P(x)$

  Notando que $P(x)$ pode ser ela mesma uma expressão quantificada.

- $\boxed{\text{Exemplo 21}}$ Seja $A(x, y)$ a sentença *"A pessoa x ama a pessoa y"* com universo de discurso como sendo todas as pessoas do mundo.

$$P : \quad \forall x.\, \exists y.\, A(x, y) \qquad \text{“Todo mundo ama alguém”}$$

$$\begin{aligned} \neg P : \quad & \neg \forall x.\, \exists y.\, A(x, y) \equiv \\ & \exists x.\, \neg \exists y.\, A(x, y) \equiv \\ & \exists x.\, \forall y.\, \neg A(x, y) \qquad \text{“Existe alguém que não ama ninguém.”} \end{aligned}$$

Negação de quantificadores aninhados

- $\boxed{\text{Exemplo 22}}$ Sejam os seguintes predicados sobre o domínio de estudantes:

$$D(x): \quad \text{“}x \textit{ sabe dirigir}\text{”}$$

$$A(x,y): \quad \text{“}x \textit{ e } y \textit{ são amigos}\text{”}$$

Sentença P:

$$\mathbf{P}: \quad \forall x.\, \exists y.\, (\, A(x,y) \land \neg D(y)\,)$$

Afirmativa: *“Todo estudante tem um amigo que não sabe dirigir.”*

$$\neg\mathbf{P}: \quad \exists x.\, \forall y.\, (\, A(x,y) \to D(y)\,)$$

Negação: *“Existe um estudante cujos amigos todos sabem dirigir.”*

Negação de quantificadores aninhados

- Exemplo 22 (Continuação)

Sejam os seguintes predicados sobre o domínio de estudantes:

$$D(x): \quad \text{“}x \text{ sabe dirigir”}$$

$$A(x, y): \quad \text{“}x \text{ e } y \text{ são amigos”}$$

Sentença Q:

$$\mathbf{Q}: \quad \exists x.\,(\, \neg D(x) \;\wedge\; \forall y.\,(\, A(x, y) \rightarrow \neg D(y)\,)\,)$$

Afirmativa: *“Há um estudante que não sabe dirigir e que não tem”* *“nenhum amigo que saiba.”*

$$\neg\mathbf{Q}: \quad \forall x.\,(\, D(x) \;\vee\; \exists y.\,(\, A(x, y) \wedge D(y)\,)\,)$$

Negação: *“Todo estudante sabe dirigir, ou tem um amigo que sabe.”*

Negação de quantificadores aninhados

- $\boxed{\text{Exemplo 22}}$ (Continuação)

Sejam os seguintes predicados sobre o domínio de estudantes:

$$D(x) : \quad \text{“}x \textit{ sabe dirigir”}$$

$$A(x, y) : \quad \text{“}x \textit{ e } y \textit{ são amigos”}$$

Sentença R:

$$\mathbf{R} : \quad \forall x.\, \exists y.\, (A(x, y) \land \neg D(y) \land \forall z.\, (A(x, z) \land \neg D(z) \rightarrow y = z))$$

Afirmativa: *“Cada estudante tem exatamente um amigo que”*
“não sabe dirigir.”

$$\neg\mathbf{R} : \quad \exists x.\, \forall y.\, (A(x, y) \rightarrow (D(y) \lor \exists z.\, (A(x, z) \land \neg D(z) \land y \neq z)))$$

Negação: *“Existe um estudante que não possui amigos que não dirijam”*
“ou que possui ao menos dois amigos que não dirijam.”

Outros tipos de quantificadores

- Até agora introduzimos os quantificadores existencial e universal.

  Estes quantificadores são os mais importantes em matemática e em computação.

- Nada impede, entretanto, que se definam outros quantificadores, como:

  1. *"Existem pelo menos 3"*
  2. *"Existem no máximo 100"*
  3. *"Existe exatamente 1"*
  4. *"Existem exatamente 35"*

  Neste curso, entretanto, vamos nos ater apenas aos quantificadores existencial e universal, por duas boas razões:

  1. os demais podem ser representados usando apenas os quantificadores existencial e universal; e
  2. as regras de inferência que veremos mais adiante no curso são muito mais simples se usarmos apenas estes quantificadores.

  A seguir veremos alguns exemplos de como esses novos quantificadores podem ser escritos em função apenas do existencial e do universal.

Outros tipos de quantificadores

- $\boxed{\text{Exemplo 23}}$ Dado um predicado $P(x)$, vamos definir o conceito de **quantificação de no máximo 1**

$$\exists_{\leq 1} x.\, P(x)$$

significando

"Existe no máximo um valor de x *no domínio tal que* $P(x)$ *é verdadeiro"*,

que é verdadeira se zero ou exatamente um valor de x no domínio torna $P(x)$ verdadeira, e é falsa se dois ou mais valores de x no domínio tornam $P(x)$ verdadeira.

Mostre que o quantificador $\exists_{\leq 1}$ pode ser escrito usando apenas os quantificadores existencial $\exists$ e universal $\forall$.

Outros tipos de quantificadores

- $\boxed{\text{Exemplo 23}}$ (Continuação)

Solução.

Note que falar que existe no máximo um valor de x que satisfaz $P(x)$ significa dizer que se há dois valores x_1 e x_2 que satisfazem $P(x)$, então x_1 e x_2 são iguais:

$$\exists_{\leq 1} x.\, P(x) \quad \equiv \quad \forall x_1.\, \forall x_2.\, (\ P(x_1) \wedge P(x_2) \ \rightarrow \ x_1 = x_2\ )$$

Alternativamente, podemos tomar a contrapositiva e dizer que se x_1 e x_2 são diferentes, então não podemos ter $P(x_1)$ e $P(x_2)$ verdadeiros ao mesmo tempo:

$$\exists_{\leq 1} x.\, P(x) \quad \equiv \quad \forall x_1.\, \forall x_2.\, (\ x_1 \neq x_2 \ \rightarrow \ \neg P(x_1) \vee \neg P(x_2)\ )$$

Outros tipos de quantificadores: unicidade

- $\boxed{\text{Exemplo 24}}$ Dado um predicado $P(x)$, sua **quantificação de unicidade** é

$$\exists! x.\ P(x)$$

significando

"Existe exatamente um valor de x no domínio tal que $P(x)$ é verdadeiro",

que é verdadeira se exatamente um valor de x no domínio torna $P(x)$ verdadeira, e é falsa se zero ou mais de um valor de x no domínio tornam $P(x)$ verdadeira.

Mostre que o quantificador $\exists!$ pode ser escrito usando apenas os quantificadores existencial $\exists$ e universal $\forall$.

Solução. Desafio para o(a) estudante!

(Relembrando: nas listas nas provas é esperado que você use apenas os quantificadores existencial e universal!)

Proposições condicionais universais

Sentença condicional universal

- Uma **sentença condicional universal** tem a forma

$$\forall x.\,(\,P(x) \to Q(x)\,)$$

- Proposições desta forma são muito comuns.

1. *"Se um número real é maior que 2 então seu quadrado é maior que 4"*:

$$\forall x \in \mathbb{R}.\,(\ (x > 2)\ \to\ (x^2 > 4)\ )$$

2. *"Todo byte tem oito bits"*:

$$\forall x.\ \ \text{“se } x \text{ é um byte, então } x \text{ tem oito bits”}.$$

- Lembre-se de que as duas proposições seguintes são equivalentes:

$$\forall x.\,(\,x \in D\ \to\ P(x)\,)\quad \equiv \quad \forall x \in D.\,P(x)$$

No geral prefere-se a segunda forma.

Negação de proposições condicionais universais

- A negação de uma sentença condicional universal é derivada como:

$$
\begin{aligned}
\neg\forall x.\,(\,P(x)\rightarrow Q(x)\,) &\equiv \exists x.\,\neg(\,P(x)\rightarrow Q(x)\,) && \text{(por De Morgan)}\\
&\equiv \exists x.\,\neg(\,\neg P(x)\vee Q(x)\,) && \text{(por equiv. de impl.)}\\
&\equiv \exists x.\,(\,P(x)\wedge\neg Q(x)\,) && \text{(por De Morgan)}
\end{aligned}
$$

- Exemplo 25

P : *"Toda pessoa loira tem olhos azuis."*

$\neg P$: *"Existe uma pessoa loira que não tem olhos azuis."*

- Exemplo 26

P : *"Se um programa foi escrito em C, ele tem um erro."*

$\neg P$: *"Existe pelo menos um programa escrito em C que não tenha erro."*

Verdade por vacuidade de proposições universais

- Lembre-se de que se a premisa p é falsa, a implicação

$$p \to q$$

  é sempre verdadeira, independente de q.

- Portanto, se $P(x)$ é falso para cada x no universo de discurso D, então uma sentença da forma

$$\forall x \in D. \, (\, P(x) \to Q(x) \,)$$

  é verdadeira, já que a implicação $P(x) \to Q(x)$ é verdadeira para todo x.

Verdade por vacuidade de proposições universais

- $\boxed{\text{Exemplo 27}}$ Sejam cinco bolas azuis, cinco brancas e um prato.
  - **Cenário 1**: três bolas azuis e uma branca são colocadas no prato.

    A afirmação

    "Todas as bolas no prato são azuis"

    é verdadeira ou falsa?

    Para ver que a afirmação é falsa, note que sua negativa é verdadeira:

    "Existe pelo menos uma bola no prato que não é azul."

Verdade por vacuidade de proposições universais

- Exemplo 27 (Continuação)

  Sejam cinco bolas azuis, cinco brancas e um prato.

  - **Cenário 2**: nenhuma bola é colocada no prato.

    A afirmação

    "Todas as bolas no prato são azuis"

    é verdadeira ou falsa?

    Para ver que a afirmação é verdadeira, note que sua negativa é falsa:

    "Existe pelo menos uma bola no prato que não é azul."

    Uma outra maneira para ver que a afirmação é verdadeira é escrevê-la explicitamente como uma sentença universal em que a hipótese da implicação é sempre falsa (e, portanto, a implicação é sempre verdadeira):

    "Para toda bola, temos que se ela está no prato, então ela é azul."

Regras de inferência para proposições quantificadas

Regras de inferência para proposições quantificadas

- Vamos discutir regras de inferência para proposições quantificadas.
  - Muito usadas em argumentos matemáticos, muitas vezes de forma implícita.

- Regras de inferência importantes para lógica de predicados:

Nome	Inferência	Condição
Instanciação universal	$\dfrac{\forall x.\ P(x)}{P(c)}\ \mathrm{I}\forall$	para qualquer c do domínio do x
Generalização universal	$\dfrac{P(c)}{\forall x.\ P(x)}\ \mathrm{G}\forall$	se c é um elemento arbitrário do domínio
Instanciação existencial	$\dfrac{\exists x.\ P(x)}{P(c)}\ \mathrm{I}\exists$	para algum c do domínio
Generalização existencial	$\dfrac{P(c)}{\exists x.\ P(x)}\ \mathrm{G}\exists$	para algum c do domínio

Regras de inferência para proposições quantificadas

- $\boxed{\text{Exemplo 28}}$ Mostre que as premissas

  a. *"Todos os matriculados em Introdução à Lógica Computacional são estudantes dedicados"*

     e

  b. *"Felipe está matriculado em Introdução à Lógica Computacional"*

     implicam a conclusão

  c. *"Felipe é um estudante dedicado"*

Regras de inferência para proposições quantificadas

- $\boxed{\text{Exemplo 28}}$ Mostre que as premissas

  (a) *"Todos os matriculados em Introdução à Lógica Computacional são estudantes dedicados"*

  e

  (b) *"Felipe está matriculado em Introdução à Lógica Computacional"*

  implicam a conclusão

  (c) *"Felipe é um estudante dedicado"*

  Solução. Vamos definir os seguintes predicados, tendo como domínio o conjunto de todas os estudantes:

  - $M(x)$: *"x está matriculado em Introdução à Lógica Computacional."*
  - $D(x)$: *"x é um estudante dedicado."*

Regras de inferência para proposições quantificadas

- $\boxed{\text{Exemplo 28}}$ (Continuação)

  As premissas do argumento são, então:

  (a) $\forall x : (\, M(x) \to D(x)\,)$

  (b) $M(\texttt{Felipe})$

  A conclusão do argumento é:

  (c) $D(\texttt{Felipe})$

  A derivação da conclusão a partir das premissas pode ser feita assim:

Passo	**Justificativa**
1. $\forall x : (\, M(x) \to D(x)\,)$	Premissa (a)
2. $M(\texttt{Felipe}) \to D(\texttt{Felipe})$	Instanciação universal de (1)
3. $M(\texttt{Felipe})$	Premissa (b)
4. $D(\texttt{Felipe})$	Modus ponens usando (2) e (3)

Regras de inferência para proposições quantificadas

- $\boxed{\text{Exemplo 29}}$ Mostre que as premissas

  (a) *"Um estudante de Introdução à Lógica Computacional não leu o livro-texto"*, e

  (b) *"Todos os estudantes de Introdução à Lógica Computacional foram bem na prova"*

  implicam a conclusão

  (c) *"Algum estudante de Introdução à Lógica Computacional que foi bem na prova não leu o livro-texto"*

Regras de inferência para proposições quantificadas

- $\boxed{\text{Exemplo 29}}$ Mostre que as premissas

  (a) *"Um estudante de Introdução à Lógica Computacional não leu o livro-texto"*, e

  (b) *"Todos os estudantes de Introdução à Lógica Computacional foram bem na prova"*

  implicam a conclusão

  (c) *"Algum estudante de Introdução à Lógica Computacional que foi bem na prova não leu o livro-texto"*

Solução. Vamos definir os seguintes predicados, tendo como domínio o conjunto de todas as pessoas:

- $M(x)$: *"x é estudante de Introdução à Lógica Computacional."*
- $L(x)$: *"x leu o livro-texto."*
- $P(x)$: *"x foi bem na prova."*

- $\boxed{\text{Exemplo 29}}$ (Continuação)

  As premissas do argumento são, então:

  (a) $\exists x : (\, M(x) \wedge \neg L(x) \,)$

  (b) $\forall x : (\, M(x) \rightarrow P(x) \,)$

  A conclusão do argumento é:

  (c) $\exists x : (\, M(x) \wedge \neg L(x) \wedge P(x) \,)$

Regras de inferência para proposições quantificadas

- $\boxed{\text{Exemplo 29}}$ (Continuação)

A derivação da conclusão a partir das premissas pode ser feita assim:

Passo	**Justificativa**
1. $\exists x : (\, M(x) \;\wedge\; \neg L(x)\,)$	Premissa (a)
2. $M(c) \wedge \neg L(c)$	Instanciação existencial de (1)
3. $\forall x : (\, M(x) \;\rightarrow\; P(x)\,)$	Premissa (b)
4. $M(c) \rightarrow P(c)$	Instanciação universal de (3)
5. $M(c)$	Simplificação conjuntiva de (2)
6. $P(c)$	Modus ponens de (4) e (5)
7. $M(c) \wedge \neg L(x) \wedge P(c)$	Adição conjuntiva de (2) e (6)
8. $\exists x : (\, M(c) \;\wedge\; \neg L(c) \;\wedge\; P(c)\,)$	Generalização existencial de (7)

Combinando regras de inferência para proposições e predicados quantificados

- Como MP e $\text{I}_\forall$ são combinadas com frequência, podemos usar a seguinte regra conhecida como **modus ponens universal**:

$$\frac{\forall x.\, P(x) \to Q(x) \qquad P(c)}{Q(c)}\ \text{MP}_\forall$$

- $\boxed{\text{Exemplo 30}}$ Suponha que a seguinte premissa seja verdadeira:

  "Para todo inteiro positivo n, se $n > 4$, então $n^2 < 2^n$".

  Sabemos que a proposição "$10 > 4$" é verdadeira.

  Por modus ponens universal, podemos concluir que "$10^2 < 2^{10}$".