

Robótica Móvel - PPGCA

Lógica Fuzzy

Prof. João Alberto Fabro

*Adaptado de material dos profs. Mauro Roisenberg e
Luciana Rech - UFSC*

Introdução

- A **Lógica Fuzzy** é baseada na teoria dos conjuntos fuzzy.
- Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou é completamente verdadeiro ou é completamente falso.
- Entretanto, na lógica Fuzzy, uma premissa varia em **grau de verdade** de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

Introdução

- Surgiu com *Lofti A. Zadeh*, Berkeley (1965).
 - para tratar do aspecto vago da informação;
 - 1978 – desenvolveu a Teoria das Possibilidades
 - menos restrita que a noção de probabilidade
 - ligar a linguística e a inteligência humana, pois muitos conceitos são melhores definidos por palavras do que pela matemática.
- É uma técnica baseada em graus de pertinência (verdade).
 - os valores 0 e 1 ficam nas extremidades
 - inclui os vários estados de verdade entre 0 e 1
 - idéia: todas as inf. admitem graus (temperatura, altura, velocidade, distância, etc...)

Introdução

- Considerando a seguinte sentença: **Joãozinho é alto.**
- A proposição é verdadeira para uma altura de Joãozinho 1.65m?
- O termo linguístico “**alto**” é vago, como interpretá-lo?
- A teoria de conjuntos Fuzzy (semântica para lógica fuzzy) permite especificar quão bem um objeto satisfaz uma descrição vaga (predicado vago)

Introdução

- **Lógica convencional:** sim/não, verdadeiro/falso
- **Lógica Fuzzy** (difusa ou nebulosa):
 - Refletem o que as pessoas pensam
 - Tenta modelar o nosso senso de palavras, tomada de decisão ou senso comum
 - Trabalha com uma grande variedade de informações vagas e incertas, as quais podem ser traduzidas por expressões do tipo: a maioria, mais ou menos, talvez, etc.

Introdução

- Sistemas baseados em lógica fuzzy podem ser usado para gerar estimativas, tomadas de decisão, sistemas de controle mecânico...
 - Ar condicionado.
 - Controles de automóveis.
 - Casas inteligentes.
 - Controladores de processo industrial.
 - etc...

Introdução

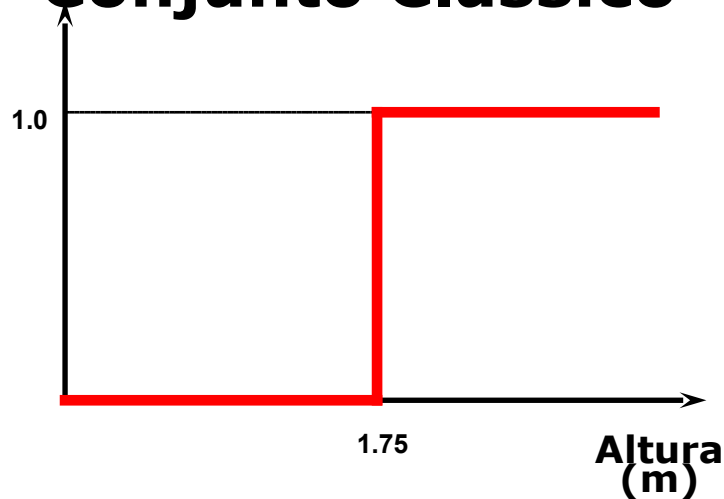
- O **Japão** é um dos maiores utilizadores e difusores da lógica fuzzy.
 - O **metrô** da cidade de Sendai utiliza desde 1987 um sistema de controle fuzzy.
 - **Aspiradores de pó e máquinas de lavar** da empresa Matsushita - carrega e ajusta automaticamente à quantidade de detergente necessário, a temperatura da água e o tipo de lavagem.
 - **TVs da Sony** utilizam lógica fuzzy para ajustar automaticamente o contraste, brilho, nitidez e cores.
 - A **Nissan** utiliza lógica fuzzy em seus **carros** no sistema de transmissão automática e freios antitravamento.
 - Mitsubishi tem um ar condicionado industrial que usa um controlador fuzzy. Economiza 24% no consumo de energia.
 - Câmeras e gravadoras usam fuzzy para ajustar foco automático e cancelar os tremores causados pelas mãos trêmulas.

Conjuntos Fuzzy

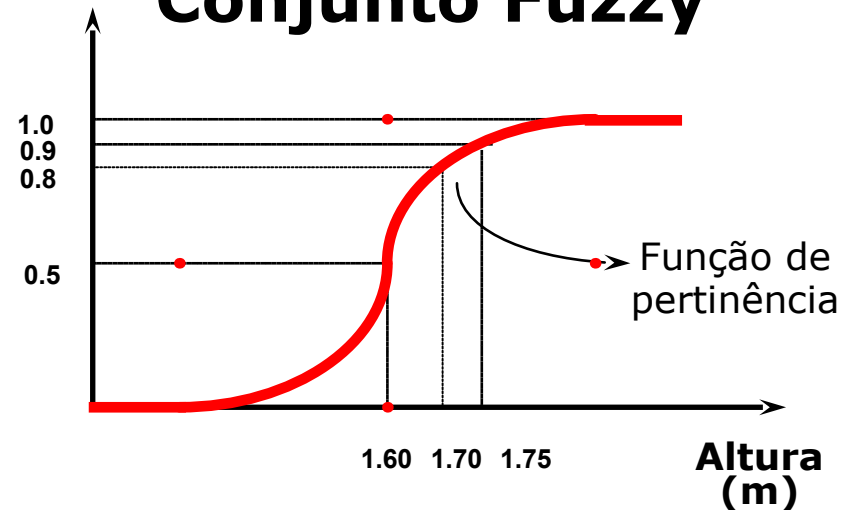
💡 Conjuntos com limites imprecisos

A = Conjunto de pessoas altas

Conjunto Clássico



Conjunto Fuzzy



Conjuntos Fuzzy

- Um conjunto fuzzy A definido no universo X é caracterizado por uma **função de pertinência** u_A , a qual mapeia os elementos de X para o intervalo $[0,1]$.

$$u_{A:X} \rightarrow [0,1]$$

- Desta forma, a função de pertinência associa a cada elemento y pertencente a X um número real no intervalo $[0,1]$, que representa o **grau de pertinência** do elemento y ao conjunto A , isto é, o quanto é possível para o elemento y pertencer ao conjunto A .
- Uma sentença pode ser parcialmente verdadeira e parcialmente falsa.

Conjuntos Fuzzy

A função de pertinência $\mu_{A(x)}$ indica o grau de compatibilidade entre x e o conceito expresso por A :

$\mu_A(x) = 1$ indica que x é completamente compatível com A ;

$\mu_A(x) = 0$ indica que x é completamente incompatível com A ;

$0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x é parcialmente compatível com A , com grau $\mu_A(x)$.

crisp

pode ser visto como um conjunto nebuloso específico (teoria de conjuntos clássica)

$\mu_A \{0,1\}$ pertinência do tipo “tudo ou nada”, “sim ou não” e não gradual como para os conjuntos nebulosos

Conjuntos Fuzzy

- Definição formal: Um conjunto fuzzy A em X é expresso como um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{ (x, u_A(x)) \mid x \in X \}$$

Diagram illustrating the components of the fuzzy set definition:

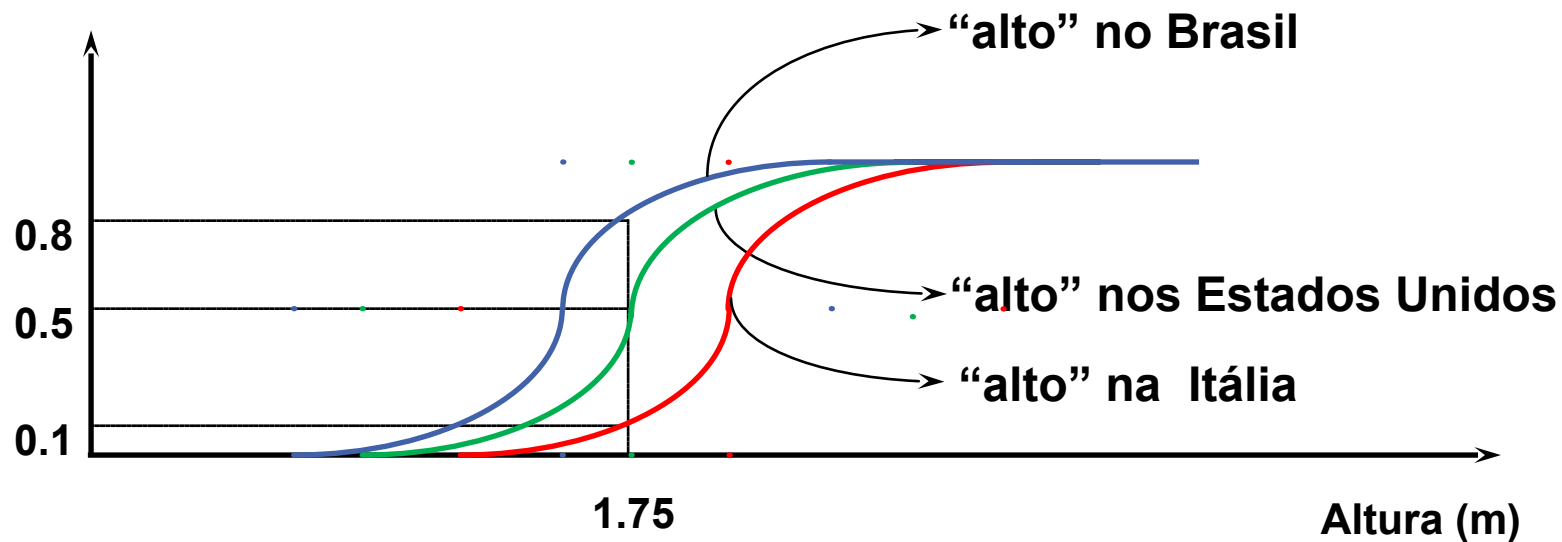
- A is identified as the **Conjunto Fuzzy**.
- $u_A(x)$ is identified as the **Função de Pertinência**.
- X is identified as the **Universo**.

Um conjunto fuzzy é totalmente caracterizado por sua função de pertinência.

Função de Pertinência

- **Reflete o conhecimento** que se tem em relação a intensidade com que o objeto **pertence ao conjunto fuzzy**.
- Várias formas diferentes.
- Características das funções de pertinência:
 - Medidas subjetivas.
 - Funções não probabilísticas monotonicamente crescentes, decrescentes ou subdividida em parte crescente e parte decrescente.

Função de Pertinência



Função de Pertinência

- **Função Triangular:**

$$\text{trimf}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$$

- **Função Trapezoidal:**

$$\text{trapmf}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$$

- **Função Gaussiana:**

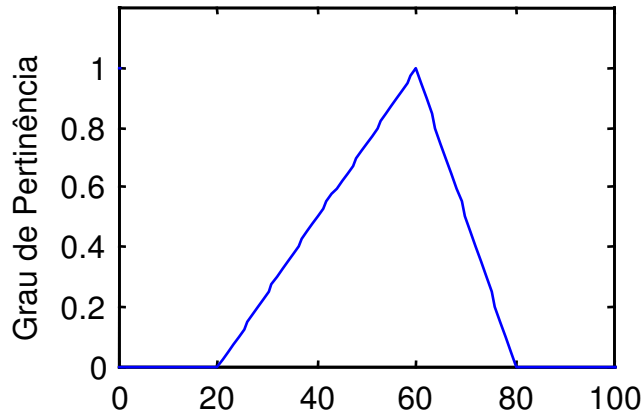
$$\text{gaussmf}(x; a, b, c) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$$

- **Função Sino Generalizada:**

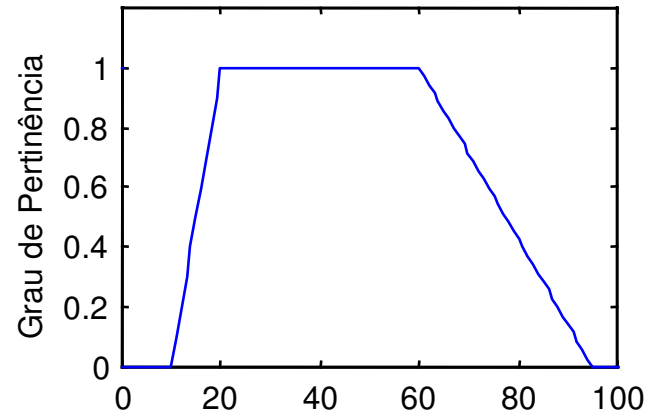
$$\text{gbellmf}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{b}\right|^{2b}}$$

Função de Pertinência

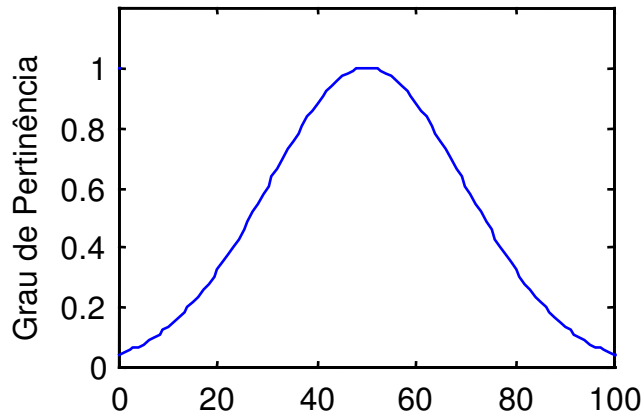
(a) Triangular



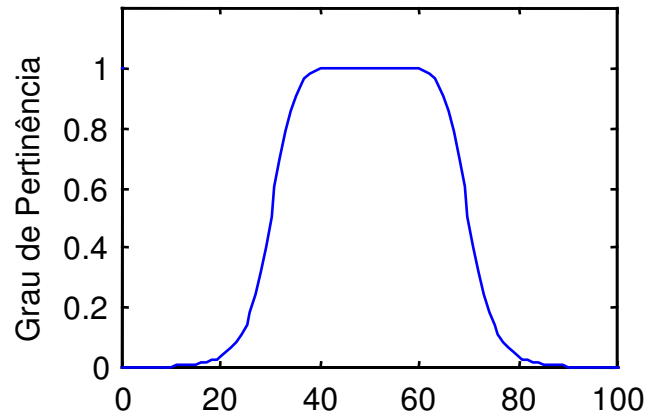
(b) Trapezoidal



(c) Gaussiana



(d) Sino Generalizada

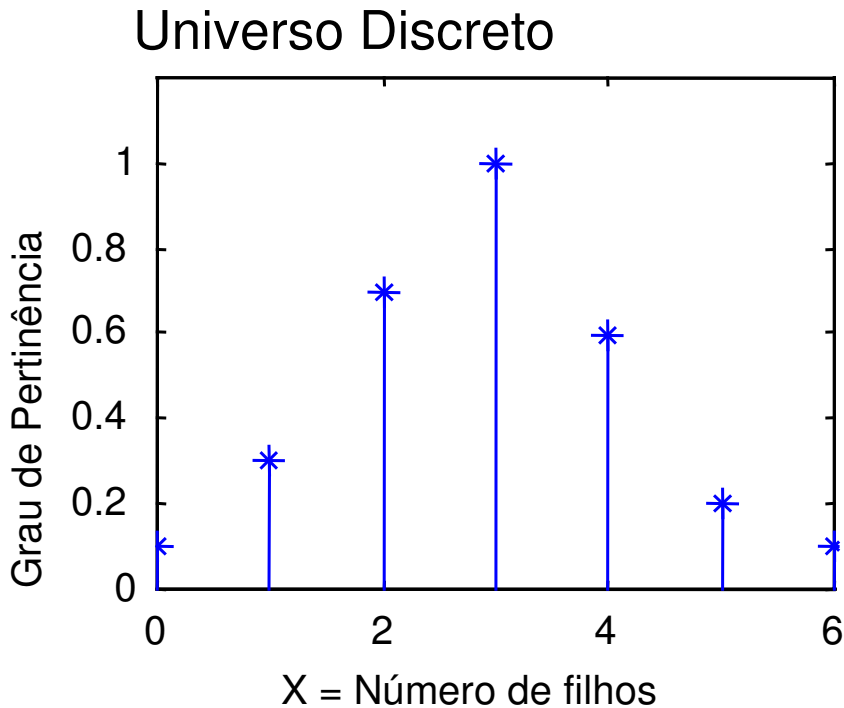


Função de Pertinência: Universo Discreto

$$X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

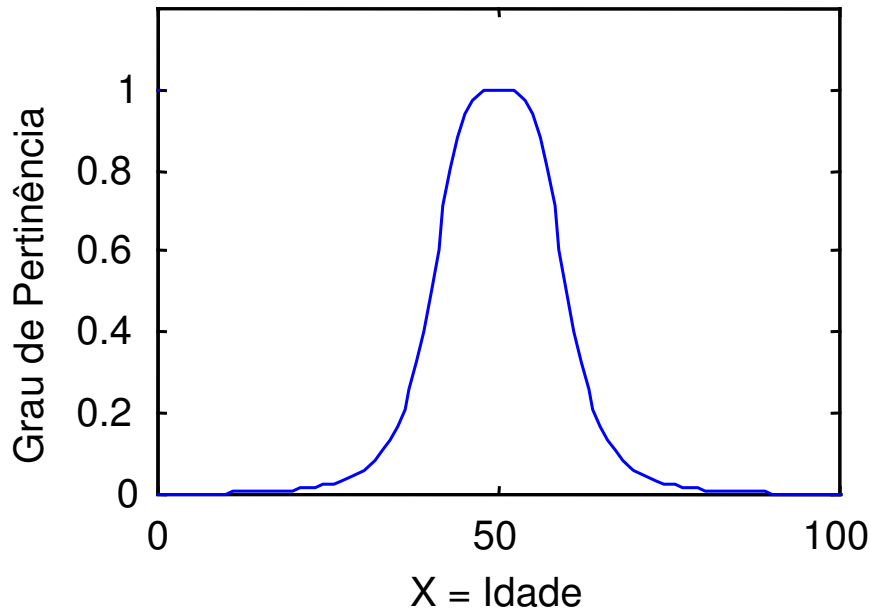
A = “Número de filhos razoável”

$$A = \{(0, 0.1), (1, 0.3), (2, 0.7), (3, 1), (4, 0.6), (5, 0.2), (6, 0.1)\}$$



Função de Pertinência: Universo Contínuo

(b) Universo Contínuo



$X =$ (Conjunto de números reais positivos)

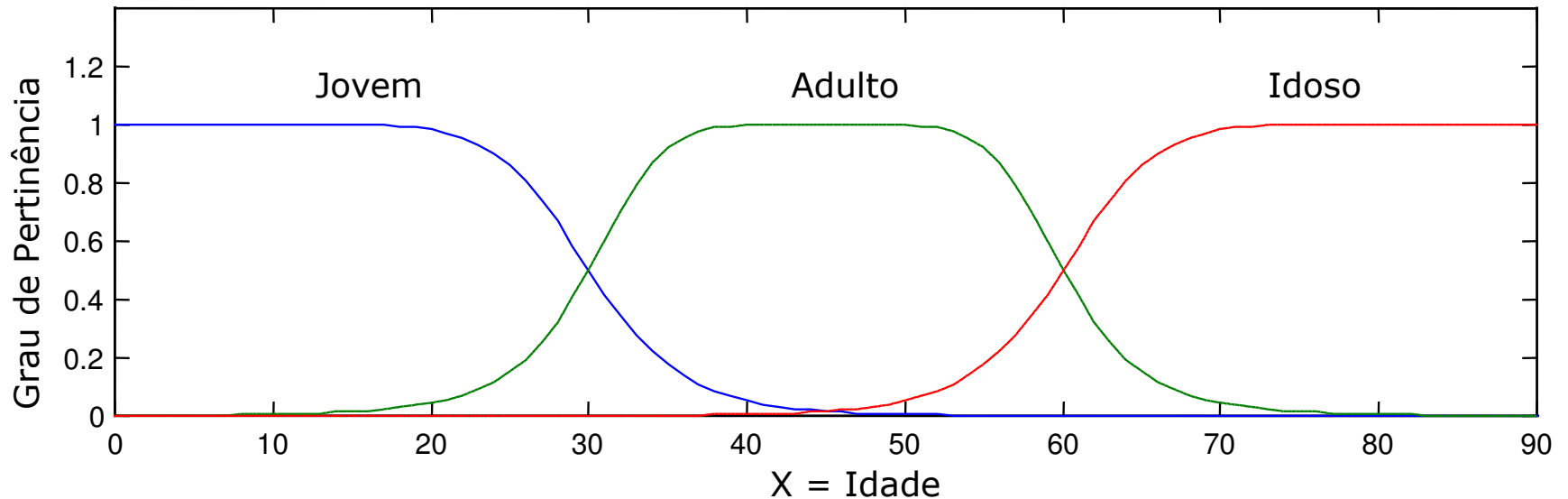
$B =$ "Pessoas com idade em torno de 50 anos"

$B = \{(x, \mu_{B(x)}) \mid x \text{ em } X\}$

$$\mu_B(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-50}{10}\right)^2}$$

Variável Linguística

- É uma partição do universo de discurso X representando “idade”, formada pelos conjuntos fuzzy “jovem”, “adulto” e “idoso”.



Variáveis Linguísticas

- Uma variável linguística possui valores que não são números, mas sim palavras ou frases na linguagem natural.
 - Idade = idoso
- Um valor linguístico é um conjunto fuzzy.
- Todos os valores linguísticos formam um conjunto de termos:
 - $T(\text{idade}) = \{\text{Jovem, velho, muito jovem, ...}$
 Adulto, não adulto, ...
 Velho, não velho, muito velho, mais ou menos velho...}
- Permitem que a linguagem da modelagem fuzzy expresse a semântica usada por especialistas. Exemplo:

Se duração_do_projeto == não muito longo **então**
risco = ligeiramente reduzido

Operações sobre conjuntos fuzzy

- Uma sentença modificada pela palavra “não” é dita “negação” da sentença original.
 - NÃO-fuzzy(x) = $1 - x$
- A palavra “e” é usada para juntar duas sentenças formando uma “conjunção” de duas sentenças.
 - E-fuzzy(x,y) = Mínimo(x,y)
- De maneira similar a sentença formada ao conectarmos duas sentenças com a palavra “ou” é dita “disjunção” das duas sentenças.
 - OU-fuzzy(x,y) = Máximo(x,y)

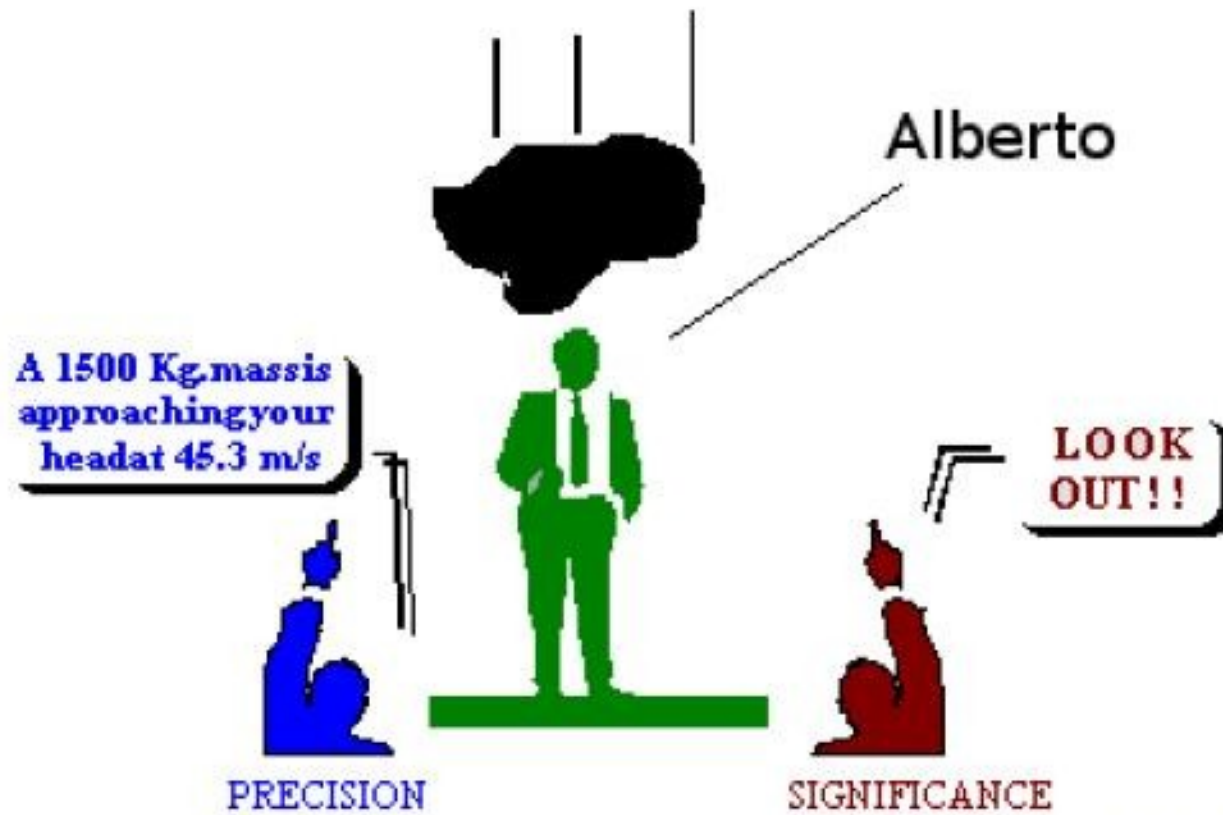
Operadores Fuzzy

- Suponha que desejássemos representar de forma fuzzy a altura de Alice (1,65 m), Bob (1,75 m), Carlos(2,0m) e Denise(1,45 m). Nossas proposições serão da forma "X é alto", e serão:
 - A = Alice é alta, $\mu(A)=0,55$
 - B = Bob é alto, $\mu(B)=0,75$
 - C = Carlos é alto, $\mu(C) = 1,0$
 - D = Denise é alta, $\mu(D) = 0,0$
- Usando os operadores fuzzy, podemos escrever sentenças como:
 - Carlos não é alto, NÃO(C), $\mu(\text{NÃO}(C))= 1,0 - \mu(C) = 0,0$
 - Bob não é alto, NÃO(B), $\mu(\text{NÃO}(B))= 1,0 - \mu(B) = 0,25$
 - Denise é alta e Alice é Alta, D e A, $\mu(D \text{ e } A)= \text{mínimo} (\mu(D), \mu(A)) = 0,0$

- A lógica está claramente associada a teoria dos conjuntos. Cada afirmação (do tipo "Carlos é alto") representa na verdade o grau de pertinência de Carlos ao conjunto de pessoas altas.
- Isso permite que conjuntos como "alto" e "baixo" sejam tratados de forma separadas e afirmações como "Carlos é alto 0,75" e "Carlos é baixo 0,5" sejam válidas simultaneamente, ao contrário do que seria esperado em um modelo *crisp*.
- Esse tipo de afirmação é facilmente encontrada na descrição, por humanos, na forma como entendem certo conceito, e a lógica difusa é uma ótima forma de tratar essa forma de incerteza.

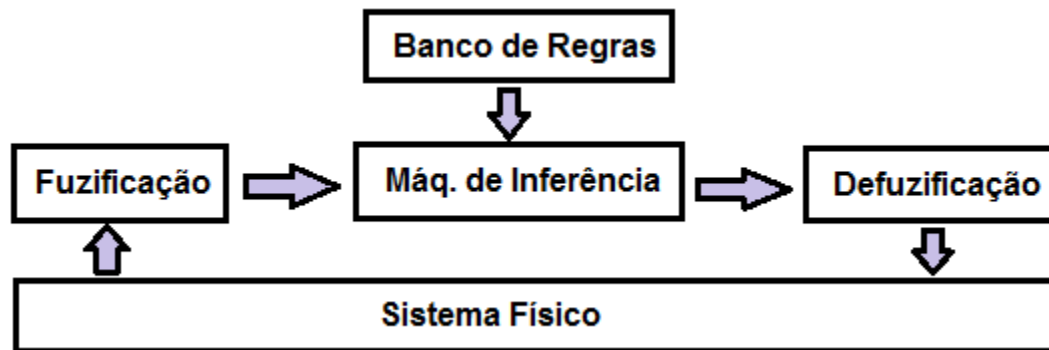
Funcionamento lógica *Fuzzy*

Lógica *Fuzzy* tem por essência gerar valores de saídas sem a necessidade de entradas precisas.



Controle Fuzzy

- Sistema de controle fuzzy baseado no modelo de Mamdani.



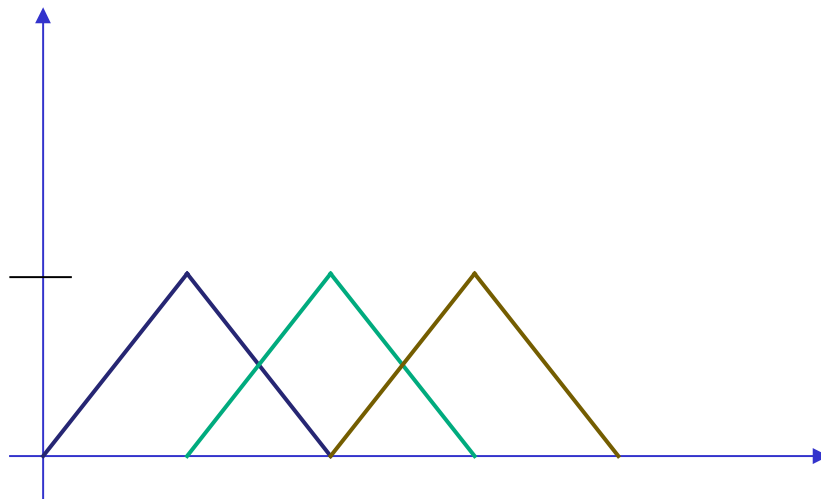
Componentes de um sistema de controle fuzzy

- Definição das variáveis fuzzy de entrada e de saída: forma e valores das variáveis
- Regras fuzzy
- Técnica de defuzzificação

Definição das variáveis

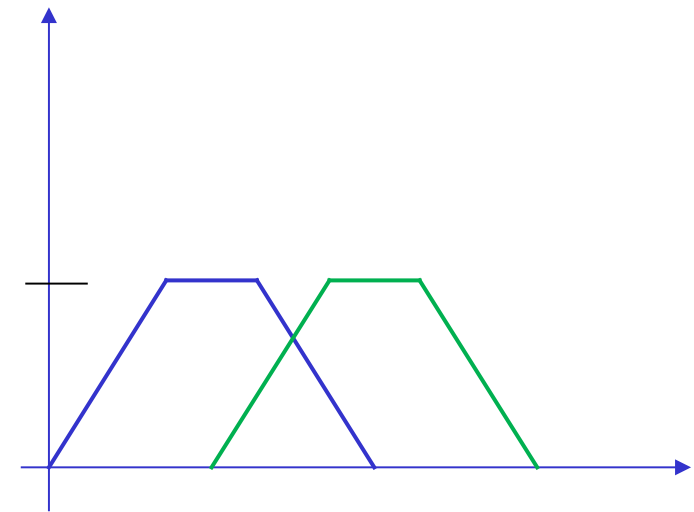
- Etapa na qual as variáveis linguísticas são definidas de forma subjetiva, bem como as funções membro (funções de pertinência)
- Engloba
 - Análise do Problema
 - Definição das Variáveis
 - Definição das Funções de pertinência
 - Criação das Regiões
- Na definição das funções de pertinência para cada variável, diversos tipos de espaço podem ser gerados:
 - Triangular, Trapezoidal, Gaussiana, ...

Exemplos de variáveis fuzzy



Frio Normal Quente

Temperatura (°C)



Lento Rápido

Velocidade(m/s)

Regras Fuzzy

SE condição ENTÃO conclusão , mas com variáveis linguísticas (fuzzy)

Exemplo:

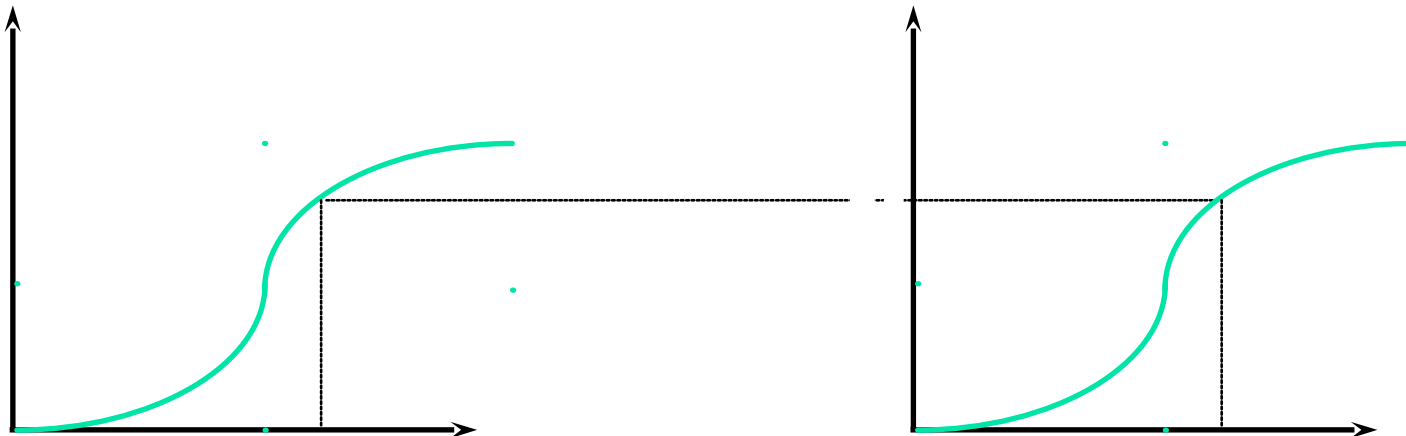
Se a **fruta é verde** então **o gosto é azedo**

Se a **fruta é amarela** então **o gosto é pouco-doce**

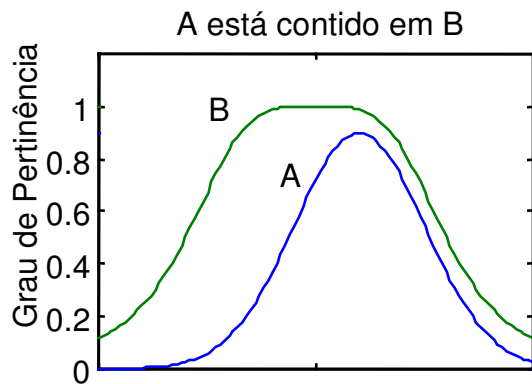
Se a **fruta é vermelha** então **o gosto é doce**

Regras Fuzzy

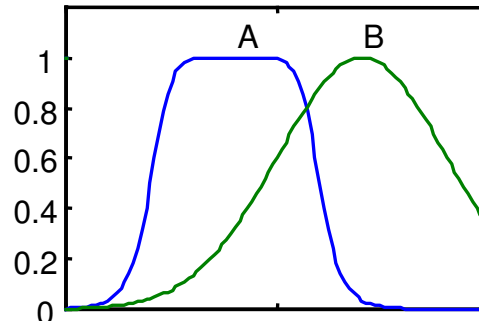
- E o raciocínio?
 - Avaliar o antecedente
 - Aplicar o resultado ao consequente
 - As regras são ativadas parcialmente, dependendo do antecedente
 - Ex: Se a altura é alta, o peso é pesado (altura = 1.85, peso = ?)



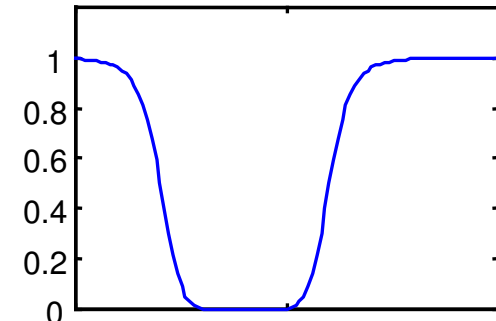
Operações Básicas



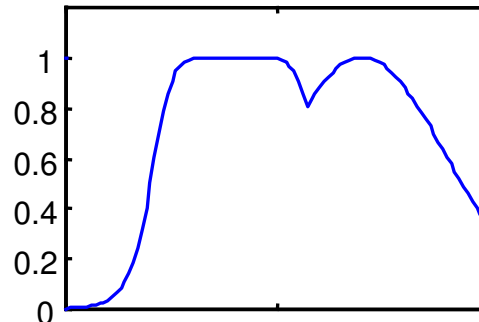
(a) Conjuntos Fuzzy A e B



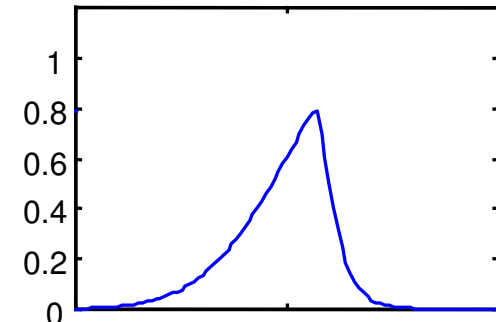
(b) Conjunto Fuzzy não "A"



(c) Conjunto Fuzzy "A ou B"



(d) Conjunto Fuzzy "A e B"



Exemplo: União e Interseção

- $X = \{a, b, c, d, e\}$
 - $A = \{1/a, 0.7/b, 0.3/c, 0/d, 0.9/e\}$
 - $B = \{0.2/a, 0.9/b, 0.4/c, 1/d, 0.4/e\}$
- União
 - $C = \{1/a, 0.9/b, 0.4/c, 1/d, 0.9/e\}$
- Interseção
 - $D = \{0.2/a, 0.7/b, 0.3/c, 0/d, 0.4/e\}$

Regras - Exemplos

Regras CRISP(Não Fuzzy):

1. Se velocidade > 100 Então
DPP é 30 metros
2. Se velocidade < 40 Então
DPP é 10 metros

Regras Fuzzy:

1. Se velocidade é alta Então
DPP é longa
2. Se velocidade é baixa
Então DPP é curta

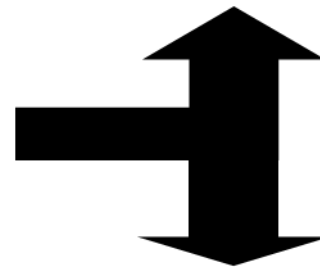
Etapas do Raciocínio Fuzzy

1ª Fuzzificação

2ª Inferência

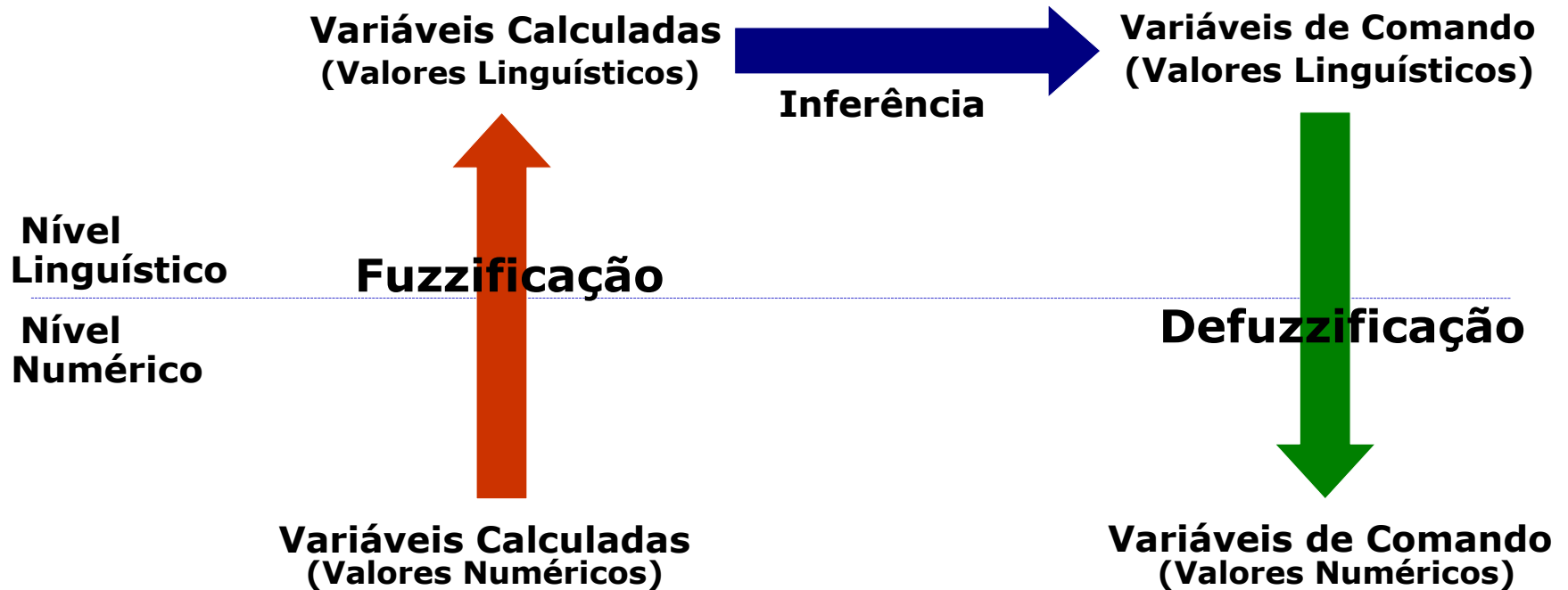
3ª Defuzzificação

Agregação



Composição

Etapas do Raciocínio Fuzzy

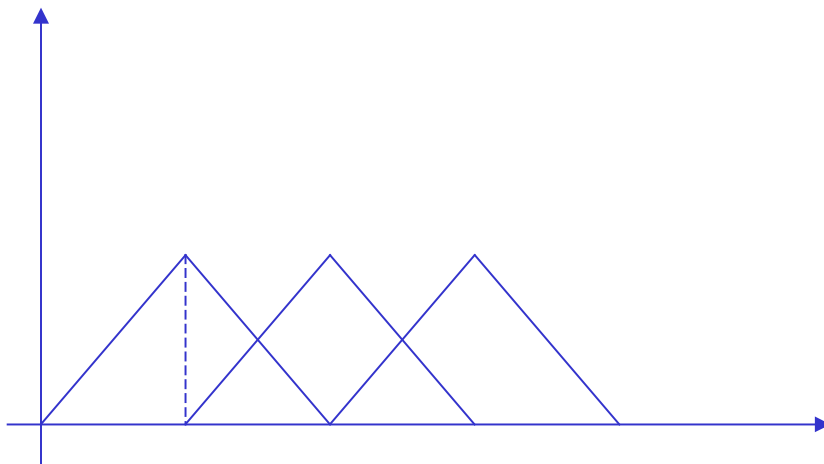


Fuzzificação

- Etapa na qual as **variáveis linguísticas** e as **funções de pertinência** são definidas de forma subjetiva.
- Engloba
 - Análise do Problema
 - Definição das Variáveis
 - Definição das Funções de pertinência
 - Criação das Regiões
- Na definição das funções de pertinência para cada variável, diversos tipos de espaço podem ser gerados:
 - Triangular, Trapezoidal, ...

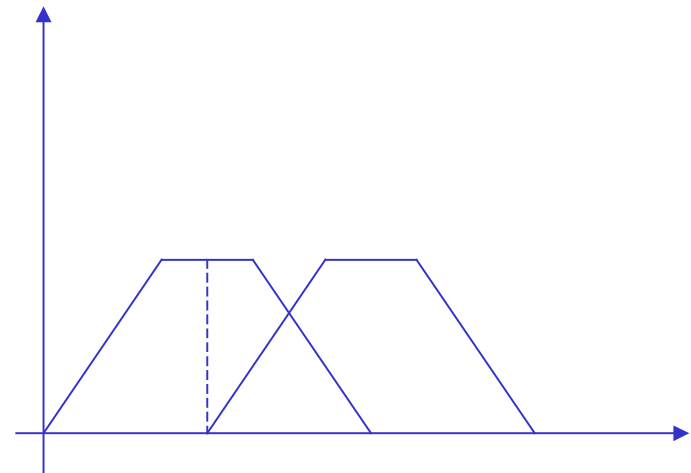
Fuzzificação

Triangular



Frio Normal Quente

Trapezoidal



Lento Rápido

Inferência Fuzzy

- Etapa na qual as proposições (regras) são definidas e depois são examinadas paralelamente
- Engloba:
 - Definição das proposições
 - Análise das Regras
 - Criação da região resultante

Inferência Fuzzy

- O mecanismo chave do modelo Fuzzy é a proposição.
- A proposição é o relacionamento entre as variáveis do modelo e regiões Fuzzy.
- Na definição das proposições, deve-se trabalhar com:
 - Proposições Condicionais:
$$\text{Se } W == Z \text{ então } X = Y$$
 - Proposições Não-Condicionais:
$$X = Y$$

Inferência Fuzzy

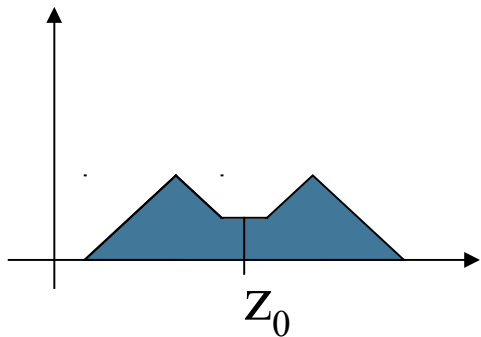
- ❗ **Agregação:** Calcula a importância de uma determinada regra para a situação corrente
- ❗ **Composição:** Calcula a influência de cada regra nas variáveis de saída.

Defuzzificação

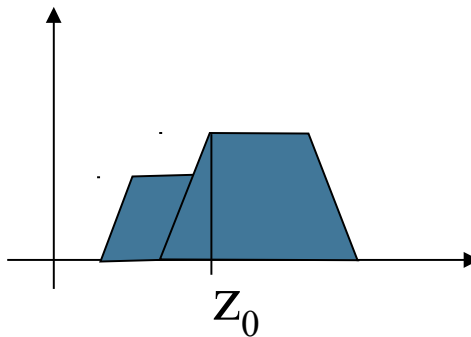
- Etapa no qual as regiões resultantes são convertidas em valores para a variável de saída do sistema.
- Esta etapa corresponde a ligação funcional entre as regiões *Fuzzy* e o valor esperado.
- Dentre os diversos tipos de técnicas de defuzzificação destaca-se:
 - Centróide
 - *First-of-Maxima*
 - Middle-of-Maxima
 - Critério Máximo

Defuzzificação

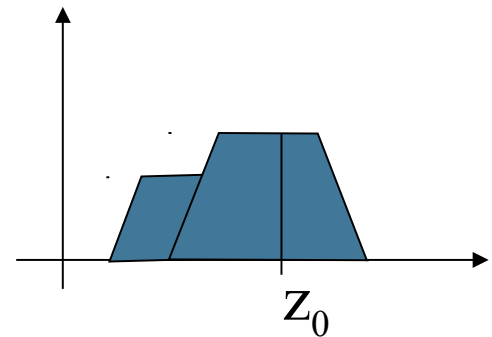
💡 Exemplos:



Centróide



First-of-Maxima



Critério Máximo

Exemplo Inferência Fuzzy

- **Exemplo:**

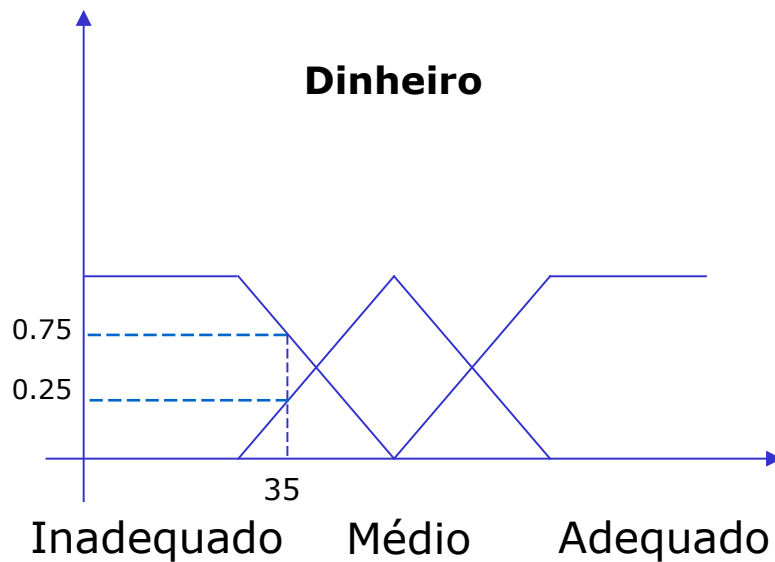
- Um analista de projetos de uma empresa quer determinar o risco de um determinado projeto.
- **Variáveis:** Quantidade de dinheiro e de pessoas envolvidas no projeto.

- **Base de conhecimento:**

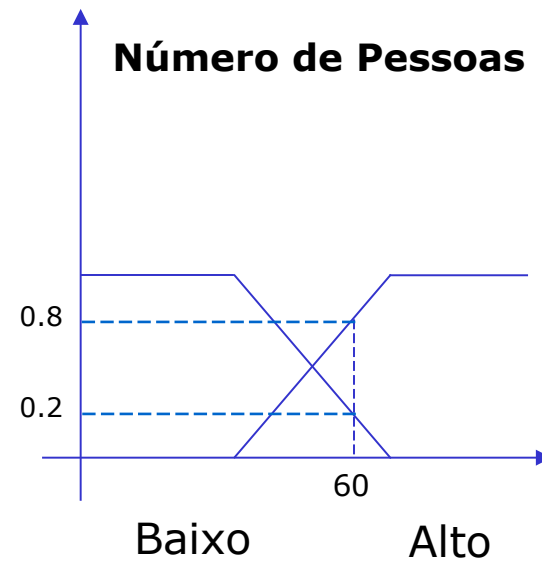
- Se dinheiro é adequado ou o número de pessoas é pequeno então risco é pequeno.
- Se dinheiro é médio e o numero de pessoas é alto, então risco é normal.
- Se dinheiro é inadequado, então risco é alto.

Exemplo Inferência Fuzzy

🔑 Passo 1: Fuzzificar



$$\mu_i(d) = 0,25 \wedge \mu_m(d) = 0,75$$



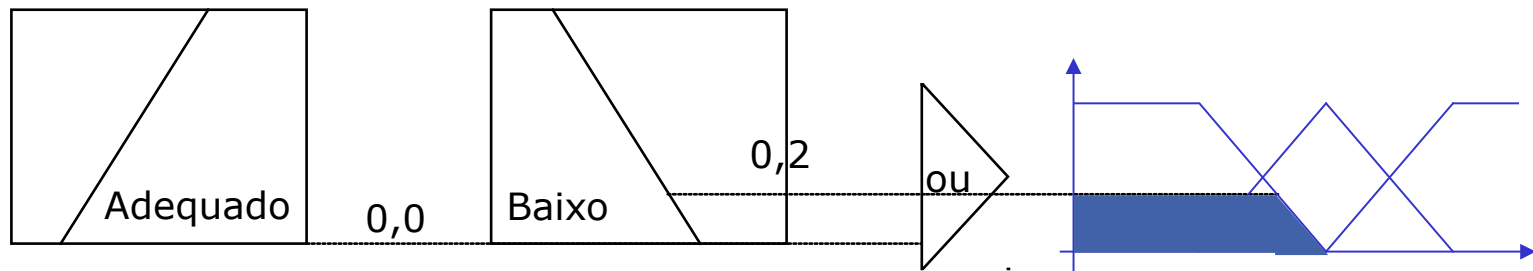
$$\mu_b(p) = 0,2 \wedge \mu_a(p) = 0,8$$

Exemplo Inferência Fuzzy

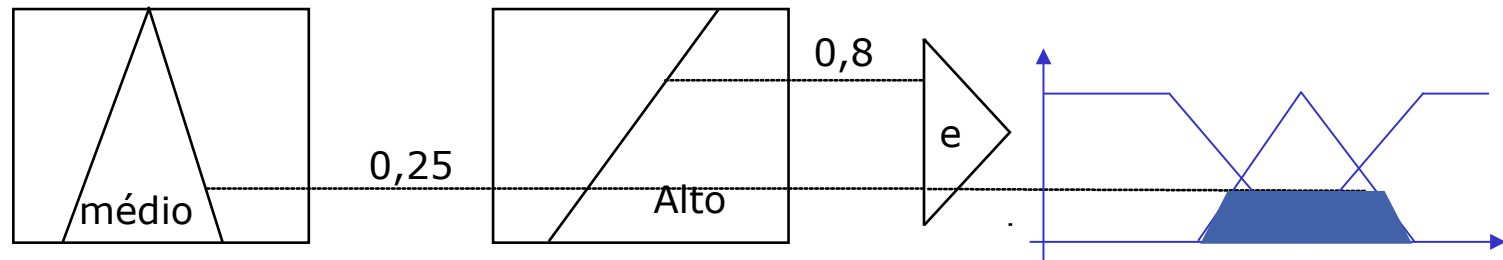
Passo 2: Avaliação das regras

Ou \rightarrow máximo e \rightarrow mínimo

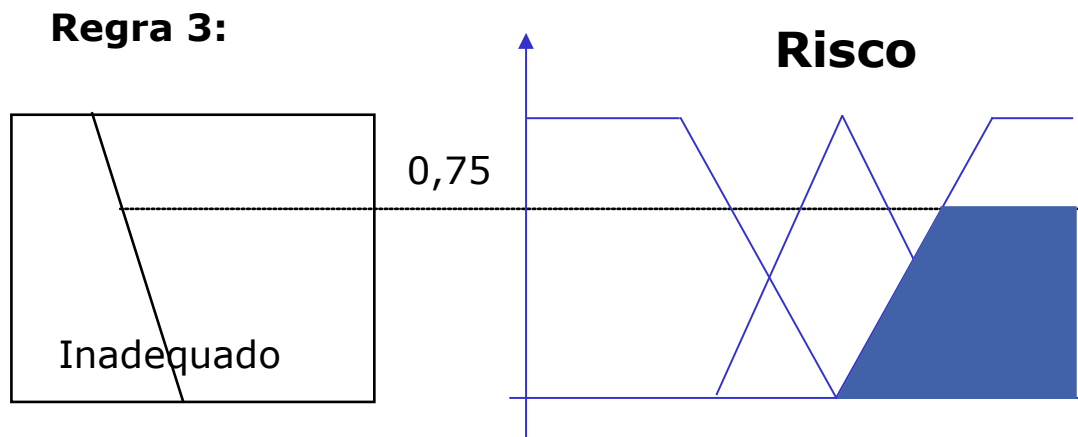
Regra 1:



Regra 2:

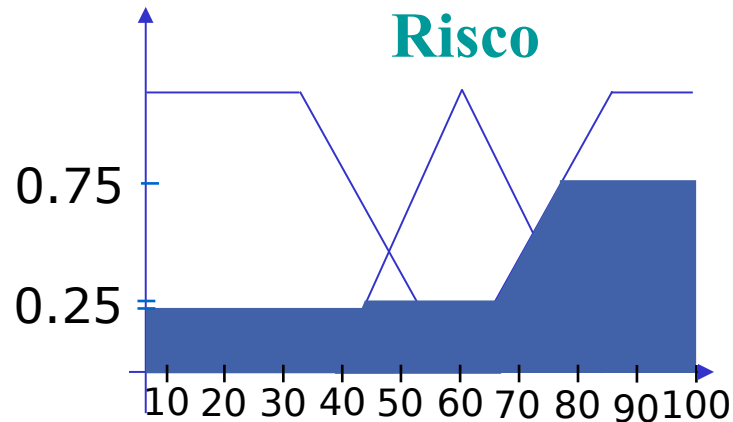


Exemplo Inferência Fuzzy



Exemplo Inferência Fuzzy

🔗 Passo 3: Defuzzificação



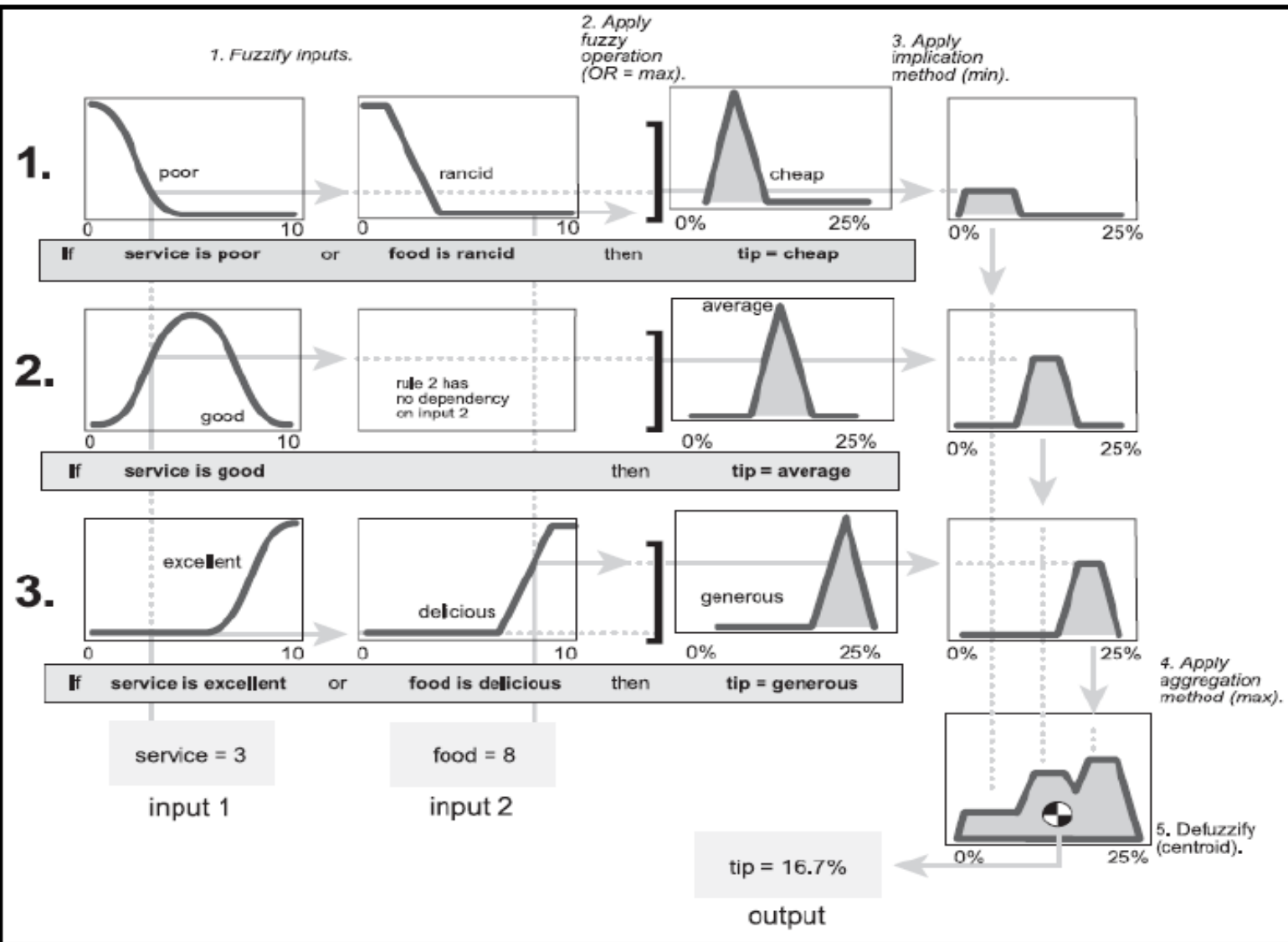
Cálculo do Centróide

$$C = \frac{(10+20+30+40)*0,2+(50+60+70)*0,25+(80+90+100)*0,75}{0,2+0,2+0,2+0,2+0,25+0,25+0,25+0,75+0,75+0,75} = \frac{267,5}{3,8} = 70,4$$

Outro Exemplo

- O sistema tem como objetivo determinar a gorjeta que um cliente deve dar.
- Esse sistema possui três variáveis (serviço, comida e gorjeta).
- As variáveis comida e serviço são variáveis de entrada e gorjeta é a variável de saída.

Outro Exemplo



Bibliotecas Fuzzy

- Softwares para auxílio a projeto e implementação de Sistemas Fuzzy:
 - Fuzzy Toolbox do Matlab
 - SciFLT for Scilab (free)
 - X-Fuzzy (free)
 - FuzzyClips (free, API para Java)
 - FLIE (Fuzzy Logic Inference Engine) do Fabro...