

Hermínio Duarte-Ramos
 Prof. Dr. Eng. Electrotécnico
 Grupo de Engenharia Sistemática (DEE/FCT/UNL)

Fundamentos dos Sistemas Difusos

1. Abordagem possibilística dos sistemas

No último quarto do século XX, o controlo difuso nasceu e foi sendo cada vez mais aplicado industrialmente, à medida que o tempo decorreu. As múltiplas vantagens que apresenta, sobretudo como metodologia inlinear e adaptativa, são bastante significativas para justificar mais investigação científica, alicerçada na lógica difusa e na teoria das possibilidades, e melhorar o desenvolvimento tecnológico, sustentado por uma base de regras heurísticas concordantes com a descrição linguística que os peritos humanos exprimem acerca da realidade concreta.

Os **sistemas difusos** (fuzzy systems) assentam na extensão da lógica booleana, onde apenas intervêm os conceitos de "verdadeiro" ou "falso", para uma lógica difusa, em que participa um certo "grau" de verdade ou de falsidade. Neste contexto, adquirem importância termos aproximativos de natureza vaga, como "pequeno" ou "grande". Assim, tende-se a exprimir raciocínios mais próximo do praticado pelos seres humanos, que não se limitam a afirmações crispadas, do tipo "sim" ou "não", mas admitem igualmente válidas ilações intermédias, do género "talvez" ou "assim assim".

A ideia fundamental do **controlo difuso** (fuzzy control) consiste em aplicar a lógica difusa aos conjuntos difusos de espécies linguísticas qualificadoras das variáveis linguísticas de entrada do respectivo sistema controlador, com vista a definir um sinal de controlo na saída, que excite o actuador de manipulação da correspondente instalação a controlar, portanto em função de medidas dos sinais no processo ou, como geralmente se faz, conforme os erros de controlo assim detectados. Neste procedimento, haverá que submeter as medidas ou erros de controlo à metodologia dos sistemas difusos, afim de efectuar deduções difusas e converter o resultado da variável linguística de saída num sinal de controlo.

A carência de um modelo exacto do processo a controlar e a existência de informação qualitativa do seu comportamento, consoante revela a experiência e a intuição humana, dão expressividade ao controlo difuso de processos complicados, cuja formulação matemática seja difícil ou impossível pelos métodos de controlo tradicionais. Por exemplo, o condutor de um automóvel em movimento numa estrada não faz a rotação do volante de guiamento da direcção numa curva em função de um ângulo expresso em graus ou radianos, mas procede antes raciocinando em termos vagos de virar "mais à esquerda" ou "menos à direita" pela observação das bermas da estrada à sua frente. Da mesma maneira,

numa travagem do veículo o condutor aplica uma força sobre o pedal do travão sem a quantificar em newtons, mas sim raciocinando com a necessidade de desaceleração.

Compreende-se, pois, que a metodologia de decisão acerca da acção de controlo tenha natureza vaga, baseando-se em estados "possíveis" do processo, perante perturbações externas ou internas, e realizando inferências lógicas a partir da recolha desses dados imprecisos. É esta natureza qualitativa e imprecisa que caracteriza os sistemas difusos, em particular os controladores de processos. De facto, a imprecisão possibilística representa a essência dos sistemas difusos. Particularmente, o controlo difuso interpreta planeamentos imprecisos dos operadores humanos com pertenças graduadas dos eventos que satisfazem as condições possibilísticas inerentes aos processos.

Note-se que os sistemas difusos atendem à "imprecisão" das variáveis linguísticas dos sistemas, dependente dos conjuntos difusos quantificadores das espécies linguísticas assumidas nos domínios de validade dessas variáveis. Questão diferente é a "incerteza" das variáveis, pois neste caso não se conhecem modos de representação quantitativa nem qualitativa.

A utilização de sistemas difusos dispensa a fastidiosa e complexa identificação de sistemas, com vista a obter o clássico modelo matemático do processo, incluindo-se implicitamente o critério de desempenho desejado, mesmo condições de optimização, nas regras de inferência difusa que conduzem à resolução dos problemas imprecisos.

2. Conceito de difusidade

Tradicionalmente, o comportamento dos sistemas trata-se através da lógica de Boole, usando a representação matemática só com valores 0 ou 1 (zero ou um), equivalentes lógicos do conceito operativo "tudo-ou-nada". No entanto, em muitas situações, os sistemas não revelam esta dicotomia comportamental, apresentando antes múltiplas possibilidades de manifestação.

Por exemplo, a temperatura confortável do ambiente num compartimento pode ser considerada normal se tiver o valor de 20° C (Fig. 1a). Todavia, se a temperatura ambiente for um pouco inferior ou ligeiramente superior a esse estado ideal, digamos no intervalo $\pm 2^\circ \text{C}$, pode-se admitir ainda o mesmo estado térmico "normal" sem qualquer inconveniente para o conforto das pessoas que se encontram dentro do compartimento. No caso de se exceder esses limites

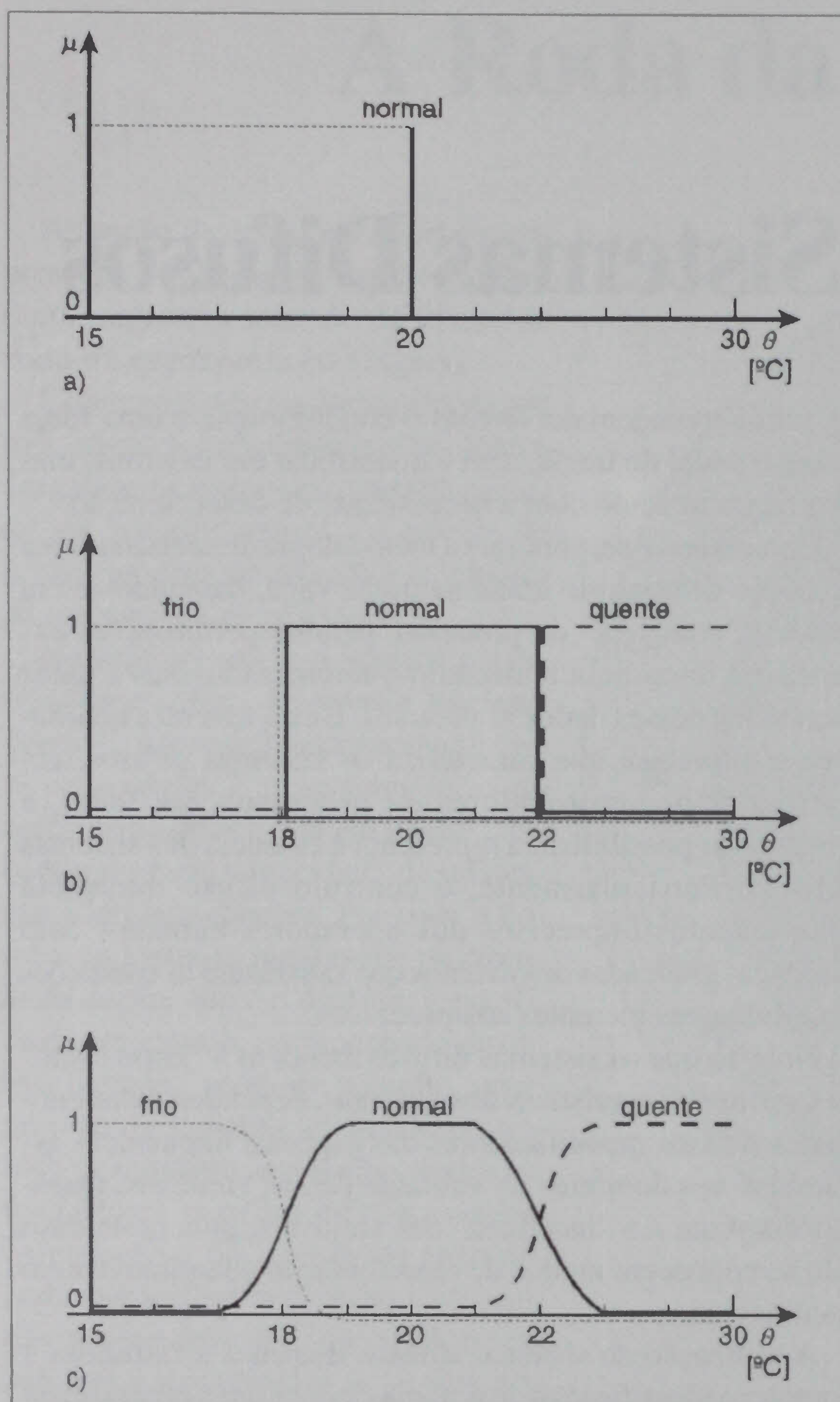


Fig. 1 - Interpretação lógica da temperatura ambiente num compartimento.
a) Temperatura discreta (normal ideal): distribuição uniplet.
b) Temperatura contínua com espécies abruptas (frio, normal, quente): repartição em conjuntos crispados (ou booleanos).
c) Temperatura contínua com espécies difusas (frio, normal, quente): repartição em conjuntos difusos.

toleráveis, entra-se numa situação de ar ambiente "frio" abaixo de 18°C ou "quente" acima de 22°C . Em ambos os eventos solicita-se uma intervenção reguladora da temperatura, para manter a normalidade térmica.

Numa *interpretação crispada*, segundo a lógica booleana, as fronteiras entre os conjuntos referidos da variável "temperatura" são abruptas (Fig. 1b): cada estado térmico (frio, normal, quente) só admite valores lógicos 1 ou 0, ou seja, "frio" até 18°C ou "não-frio" acima de 18°C , "normal" desde 18°C até 22°C ou "anormal" fora desta gama de temperaturas e "quente" acima de 22°C ou "não-quente" abaixo de 22°C . Nestas condições, fala-se de um *conjunto crispado* (crisp set), para o distinguir do conjunto difuso (fuzzy set). É evidente que esta repartição não traduz o que se pressente na realidade. Por exemplo, se à temperatura de 18°C o ambiente se considera normal, com $17,9^\circ\text{C}$ os conjuntos cris-

pados indicam um ar frio, o que na verdade não coincide com o sentimento de qualquer pessoa. A conclusão a extrair, inevitavelmente, afirma que as variações bruscas nas espécies linguísticas não são correctas para emular o raciocínio humano.

Segundo a *concepção difusa*, a temperatura nas transições dos conjuntos considerados assume uma variação gradual (proporcional ou não), geralmente do modo complementar entre os conjuntos lógicos (Fig. 1c). Exemplificando, na zona de 18°C , à medida que se tem menos a sensação de frio aumenta mais a sensação do conforto respeitante à temperatura normal de 20°C ; analogamente, quando o ambiente térmico excede um pouco esta temperatura ideal começa-se a sentir um ambiente mais quente e a partir de certo valor da temperatura estabelece-se definitivamente a sensação de ambiente quente, anulando-se qualquer aceitação de normalidade. Quer dizer, os *conjuntos difusos* têm valores entre 0 e 1, portanto com graus de pertença intermédia em cada conjunto das espécies térmicas (frio, normal, quente). Repare-se que a rigidez dicotómica de Boole atende apenas aos limites 0 e 1, enquanto no conceito difuso se constata uma imprecisão vaga entre 0 e 1 nos diversos conjuntos.

Esta *difusidade* (fuzziness) caracteriza-se por dados heurísticamente estabelecidos com uma determinada possibilidade de ocorrência, ditada pela experiência e intuição dos peritos humanos que interpretam as variáveis linguísticas a tratar. Isto significa que os valores dos conjuntos difusos não têm natureza estatística, já que não se definem por uma lei de probabilidades. Por isso, a difusidade distingue-se perfeitamente da noção de aleatoriedade.

3. Processamento difuso

Historicamente, a lógica de Boole veio do século XIX e só se aproveitou no âmbito científico e tecnológico na segunda metade do século XX, com o desenvolvimento dos sistemas digitais, em particular pelas aplicações dos computadores.

Embora Lukasiewicz tenha proposto a "lógica multi-nível" na década de 1930, foi Lofti Zadeh que em 1962 a designou por "lógica difusa" e em 1965 fundamentou a teoria dos conjuntos difusos, cuja aplicação tecnológica se evidenciou principalmente após 1985, quando os japoneses a usaram com vantagens técnicas e comerciais em diversos produtos industriais (travagem do metropolitano, regulação de guias em portos marítimos, controlo de braços manipuladores de robôs, etc.) e produtos para o grande público (electrodomésticos, câmaras de video, máquinas de fotografar, etc.).

O êxito da resolução destes problemas de controlo suscitou em todo o mundo, principalmente entre europeus e americanos, o interesse dos cientistas e engenheiros pela investigação científica e tecnológica em diversas áreas do conhecimento (engenharia, economia, medicina, ecologia, etc.).

Desta maneira, já na década de 1990 se implementaram numerosos sistemas de controlo difuso, proporcionando melhor desempenho que os sistemas de controlo convencionais.

Apesar de haver ainda muito trabalho fundamental por fazer, no sentido de evidenciar todas as potencialidades dos sistemas difusos, a metodologia geral para conceber e construir um sistema de controlo difuso assenta numa cascata de três estruturas: na "interface real-difusa" faz-se a *difusificação* (fuzzification), que consiste em representar as variáveis linguísticas de entrada por meio de conjuntos difusos; a "interface difusa-difusa" que se segue pratica a *inferência difusa* (fuzzy inference), calculando os valores de saída consoante as entradas por dedução com regras linguísticas; finalmente, a "interface difusa-real" efectua a *desdifusificação* (defuzzification), convertendo os valores de saída no sinal de controlo efectivamente excitador do actuador do processo a controlar.

4. Difusificação do mundo real

Para efectuar a difusificação mostra-se importante assimilar algumas noções básicas dos sistemas difusos. Só conhecendo esses conceitos se pode realizar o primeiro passo do processamento difuso.

A descrição de inúmeras situações concretas referentes a uma dada variável faz-se por intermédio de expressões linguísticas, com carácter qualitativo, que consistem nas *espécies linguísticas* (linguistic specimens) caracterizadoras de todas as situações possíveis dessa variável. São exemplos vulgares de *espécies bivalentes* (two-valued specimens): baixo e alto, lento e rápido, normal e anormal, novo e velho, jovem e idoso, frio e quente, pequeno e grande. Às vezes refina-se mais a discriminação com *espécies trivalentes* (three-valued specimens): baixo, médio, alto; lento, moderado, rápido; jovem, meia-idade, idoso; frio, morno, quente; pequeno, médio, grande. Ainda se usam termos gradativos do tipo intensivo (pouco, muito; menos, mais; abaixo de, acima de) para diversificar *espécies multivalentes* (multi-valued specimens): muito baixo, baixo, médio, alto, muito alto; muito frio (gelado), frio, morno, quente, muito quente (escaldante).

Os limites destes termos difusos são imprecisos, esbatendo-se numa certa gama mais ou menos extensa da respectiva variável linguística. Por exemplo, uma "pessoa baixa" é assim considerada relativamente aos outros componentes da sua comunidade quando não seja ambígua outra classificação, como uma "pessoa média" e muito menos "pessoa alta". Mas há uma determinada zona de alturas em que uma pessoa pode ser julgada baixa por uns e como tendo altura média por outros, conforme os padrões subjectivos quanto à altura dos seres humanos. Neste contexto, porém, não há dúvidas na atribuição linguística, dentro das três espécies admitidas (baixa, média, alta), a um anão (que é manifestamente baixo) ou a um gigante (evidentemente alto). Mas surgem várias possibilidades interpretativas da variável linguística "altura" de pessoas nas transições entre as espécies baixa e média, ou entre a média e a alta. Aliás,

na linguagem comum é costume referir quem tenha a altura de 1,80 m como uma pessoa "alta" em vez de dizer que tem "1,80 m de altura".

As variáveis linguísticas podem ser contínuas ou discretas. Uma *variável contínua* (continuous variable) possui uma certa distribuição de possibilidade ao longo da variável linguística. É o caso da "altura" das pessoas (Fig. 2a). Todavia, às vezes torna-se indispensável introduzir uma *variável discreta* (discrete variable), que assume valores singulares, sem corresponder a qualquer distribuição de possibilidade. Por exemplo, a variável linguística "rodas" dos veículos pode ser 2, 4, 6 ou 8, verificando-se neste multipeto sempre o valor lógico 1, enquanto fora dele ocorre o valor lógico 0 (Fig. 2b).

Uma espécie linguística representa-se matematicamente por um *conjunto difuso* (fuzzy set), formado por valores lógicos referentes à possibilidade de ocorrência. Em geral, os valores de um conjunto difuso variam entre 0 e 1, dizendo-se que se trata de um *conjunto normal* (normal set). Exemplificando, a "velocidade" de um veículo numa auto-estrada pode ser "baixa", "moderada" ou "alta", definindo três espécies linguísticas às quais correspondem três conjuntos difusos, cada um normado desde 0 até 1 (Fig. 3a). Contudo, após as inferências difusas é natural que a altura de um conjunto seja inferior a 1, falando-se então de um *conjunto subnormal* (subnormal set). É claro, chama-se *al-*

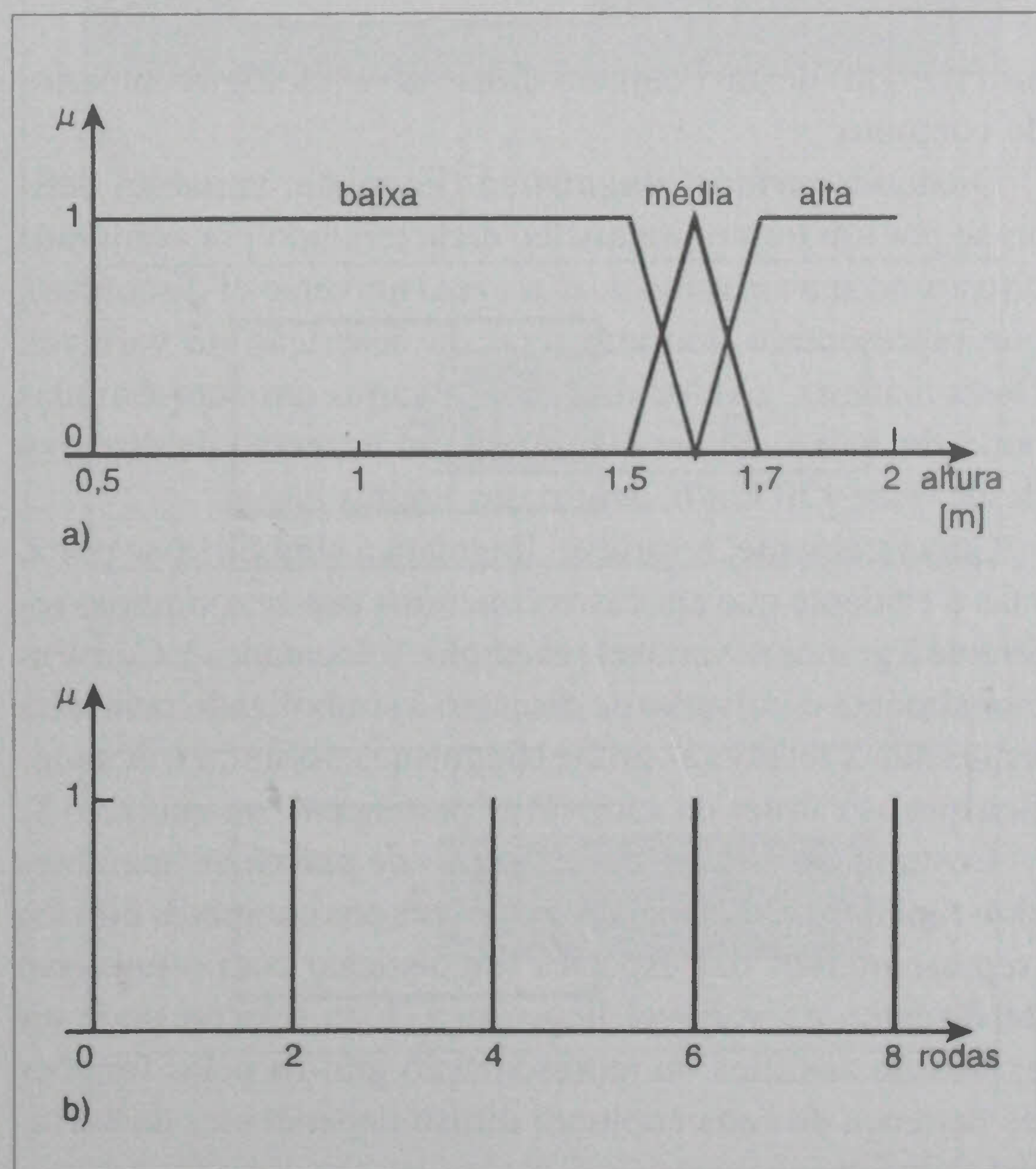


Fig. 2 - Conjuntos difusos contínuos e discretos.

- a) Espécies linguísticas contínuas de "altura" de pessoas: baixa, média e alta.
- b) Espécies linguísticas discretas das "rodas" de veículos: quatro 2, 4, 6 e 8.

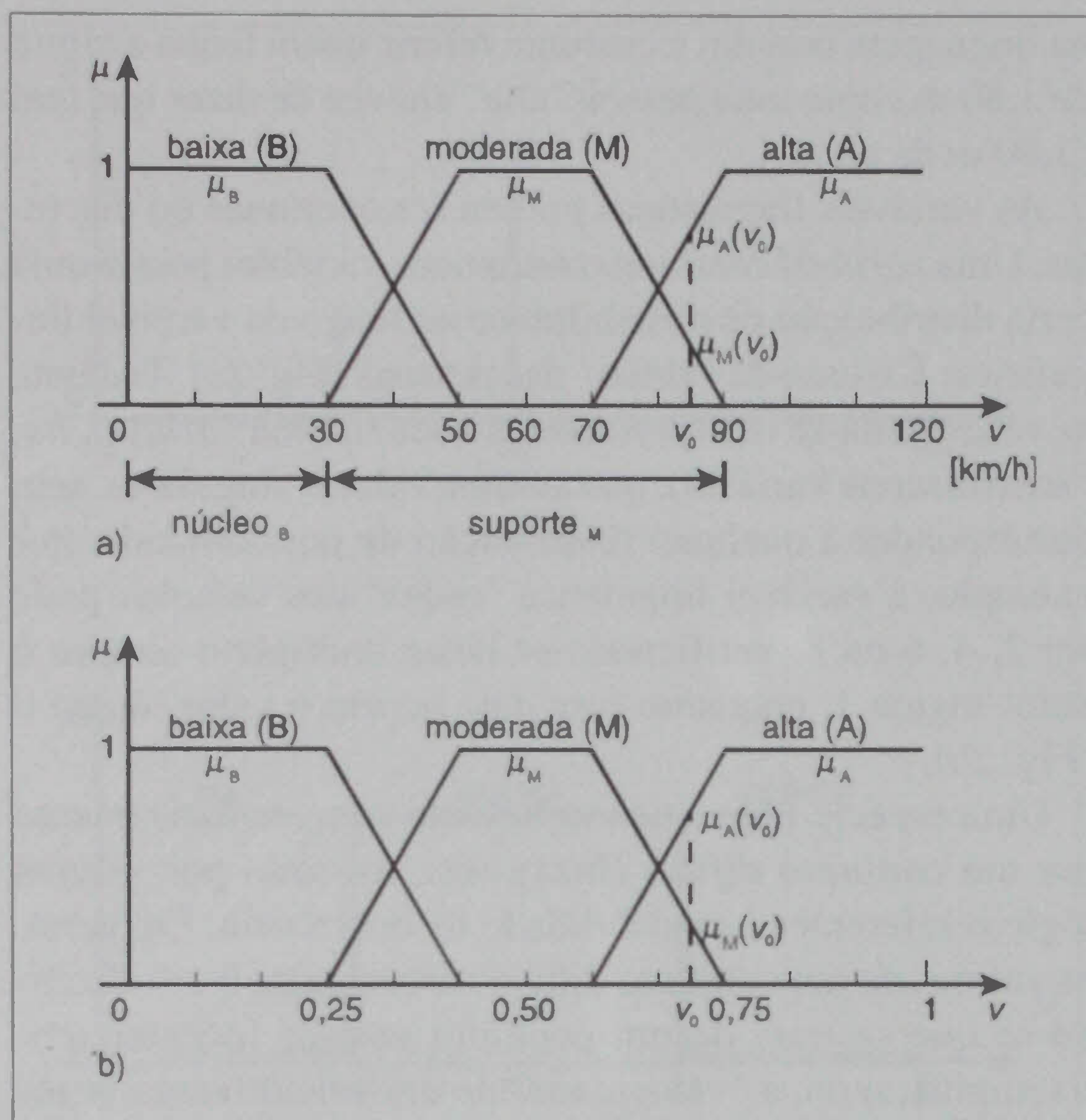


Fig. 3 - Função de pertinência da velocidade de um veículo numa auto-estrada.

- a) Variável linguística real "velocidade" (expressa em km/h) e definição das funções de pertinência dos conjuntos difusos "baixa", "moderada" e "alta". Definição de suporte e núcleo de um conjunto difuso.
- b) Variável linguística normada "velocidade" (com coeficiente de escala igual a 1/120 km/h).

tura (height) de um conjunto difuso ao valor lógico superior do conjunto.

Qualquer *variável linguística* (linguistic variable) define-se por um termo linguístico caracterizado por conjuntos difusos no seu *universo de discurso* (universe of discourse), que representa o domínio total de descrição da variável. Desta maneira, a velocidade dos veículos nas auto-estradas pode ser baixa, moderada ou alta no universo de discurso desde 0 até 120 km/h, dentro dos limites legais.

Genericamente, a variável linguística simboliza-se por x , mas é evidente que em casos concretos usa-se o símbolo referente à grandeza variável (exemplo: velocidade v). Convencionalmente o universo de discurso é simbolizado pela letra maiúscula X relativa à variável linguística. Assim, $x \in X$ significa que os valores da variável x "pertencem" ao universo X .

Costuma-se estabelecer a *função de pertinência* (membership function) relacionando os valores dos conjuntos difusos (representativos das espécies linguísticas) com o universo de discurso da variável linguística. Esta relação pode ter expressão analítica ou representação gráfica pelas funções de pertinência de cada conjunto difuso dependentes da variável linguística.

De um modo geral, a função de pertinência simboliza-se por μ e para identificar a variável respectiva inscreve-se o seu símbolo como argumento, isto é, usa-se a notação $\mu(x)$. Para indicar a função de pertinência de uma espécie linguística

ou de um conjunto difuso especifica-se em índice o seu nome ou o símbolo do conjunto. Assim, um conjunto C da variável linguística x tem a função de pertinência $\mu_C(x)$. Por exemplo, a velocidade de um automóvel possui a função de pertinência $\mu(v)$ e supondo os três conjuntos difusos de velocidade baixa (B), moderada (M) e alta (A) pode-se afirmar a função de pertinência $\mu_{\text{alta}}(x)$ ou $\mu_A(x)$ para a espécie alta da velocidade (Fig. 3a).

A função de pertinência de uma variável linguística apresenta graficamente sucessivos segmentos (curvilíneos ou rectilíneos), respeitantes aos diversos conjuntos difusos, pois estes variam entre 0 e 1 nos conjuntos normais, segundo a respectiva função de pertinência de cada conjunto. Os valores da variável linguística x onde um conjunto difuso não é nulo, ou seja, $\mu_C(x) \neq 0$, constituem o *suporte* (support) do conjunto e aqueles em que $\mu_C(x) = 1$ determinam o *núcleo* (nucleus) do conjunto ou da correspondente espécie linguística (Fig. 3a). Quando o núcleo do conjunto difuso se reduz a um único valor da variável linguística, esse núcleo estabelece o chamado *valor de pico* (peak value) do conjunto, como exemplifica a espécie "média" da figura 2a.

Muitas vezes convém realizar a *normação* (normalization) do universo de discurso da variável linguística, aplicando a esta variável um *coeficiente de escala* (scaling coefficient) criteriosamente escolhido. Note-se que a literatura costuma designar "factor de escala" (scaling factor), mas erradamente, porque esta norma usada para referência é "dimensional", resultando então, isso sim, factores normados. A normação das variáveis linguísticas no controlo difuso origina um universo de discurso $[-1, 1]$, porque o erro de controlo tanto pode ser positivo como negativo em torno do erro nulo. Mas tal não é obrigatório noutras aplicações. No exemplo da velocidade de um veículo numa auto-estrada, a normação com o coeficiente de escala igual a 1/120 km/h configura o universo de discurso de 0 a 120 km/h no intervalo normado $[0, 1]$, como bem se compreende (Fig. 3b). Se o universo de discurso exceder os limites admitidos (caso a velocidade do veículo seja superior ao estipulado legalmente, como 150 km/h nas auto-estradas) será vantajoso utilizar um coeficiente de escala que insira tais situações no intervalo normado.

Os cálculos pela lógica difusa baseiam-se em valores lógicos fornecidos pela função de pertinência das variáveis linguísticas. Chama-se *grau de pertinência* (membership degree) de um conjunto difuso, para um dado valor da variável linguística, ao valor lógico correspondente da função de pertinência desse conjunto. Quer dizer, se for $x = x_0$, a função de pertinência $\mu_C(x)$ do conjunto C fornece o grau de pertinência $\mu_C(x_0)$, como exemplifica a figura 3 para os conjuntos $\mu_M(v)$ e $\mu_A(v)$ na velocidade v_0 de um veículo numa autoestrada.

5. Inferência difusa

Uma vez feita a difusificação procede-se à inferência difusa, partindo das funções de pertinência das variáveis lin-

guísticas de entrada e de saída do sistema e usando regras de dedução difusa, com base na lógica difusa, até se conseguir estabelecer a função de pertença resultante do sistema.

Para isso, a **lógica difusa** (fuzzy logic) trata matematicamente as aproximações linguísticas, por meio de conectores específicos e propriedades lógicas que relacionam conjuntos difusos. Genericamente, a lógica opera sobre conjuntos com um certo universo de discurso. A lógica difusa de Zadeh considera o universo $[0, 1]$, enquanto a lógica crispada de Boole toma só dois valores discretos $\{0, 1\}$. Será, pois, de esperar que a lógica difusa exprima uma generalização da lógica booleana.

No controlo difuso interessam principalmente os *conectores* (connectors) de negação "not" (em português: "não"), intersecção "and" (copulativa "e") e união "or" (disjuntiva "ou"), que se usam para operar sobre espécies linguísticas (Fig. 4). Entre as propriedades aplicáveis evidenciam-se a comutativa, a associativa e a distributiva. Através de algumas convenções definem-se os operadores difusos que manipulam as funções de pertença dos conjuntos próprios das variáveis linguísticas. Na escrita dos conectores lógicos convencionam-se usar os termos da língua inglesa para evidenciar o seu significado operativo nas proposições redigidas na língua portuguesa.

Para fazer deduções com conjuntos difusos utilizam-se **regras de inferência** (inference rules), formatando afirmações condicionais como *implicações* do tipo "if-then" (em português: "se-então") segundo o paradigma

if (antecedente) then (consequente)

onde o *antecedente* constitui a premissa relativa às entradas com as "condições lógicas" impostas sobre essa variável linguística, e o *consequente* diz respeito às "acções" decorrentes dessas condições na variável de saída, limitando os conjuntos difusos da função de pertença desta variável.

No controlo difuso costuma haver múltiplas regras de inferência, de acordo com a natureza dos estados medidos no processo. Todas as regras de inferência envolvidas numa aplicação formam uma *base de regras*, com o formato

if (antecedente₁) then (consequente₁) or
if (antecedente₂) then (consequente₂) or
.....
if (antecedente_n) then (consequente_n)

constituindo n regras computacionais em lógica difusa que, combinadas com a descrição das variáveis linguísticas pelas suas funções de pertença, permitem imitar os modos como os seres humanos pensam e actuam por intuição aproximativa.

No procedimento dedutivo intervêm **operadores difusos** (fuzzy operators) sobre conjuntos difusos ou funções de pertença das respectivas espécies linguísticas, através de operações de lógica difusa inseridas nas implicações de inferência e resolvem conflitos quanto às decisões a tomar sempre que disparam várias regras simultaneamente. De facto, numa regra de inferência o antecedente forma-se pela

conexão lógica dos conjuntos difusos de variáveis linguísticas, utilizando os conectores lógicos (geralmente "and"). Além disso, as diversas regras de inferência numa aplicação conectam-se sucessivamente pelo conector "or".

As formulações mais simples dos operadores difusos compreendem os *operadores conectivos*, baseados nos conectores de negação, intersecção, união e implicação, que originam a definição dos operadores "negação", "mínimo" e "máximo", além da "implicação" nas regras de inferência. Afim de simplificar os cálculos no controlo difuso, porém, usam-se preferencialmente *operadores aritméticos* definidos por operações de "produto" e de "soma" (em rigor, a média aritmética). Ainda existem *operadores ponderados*, com a inclusão de um peso, que permitem abordagens mais específicas e degeneram nos operadores anteriores com valores particulares do peso (Quadro 1). No entanto, sendo mais complicados, evitam-se estes operadores no controlo difuso.

Ficam assim construídas as bases de execução das inferências difusas. Para tal usa-se o designado **motor de inferências** (inference engine), que provoca o disparo das regras individualmente, com o seguinte funcionamento: primeiro calcula-se o grau de pertença adaptado às entradas crispadas e os

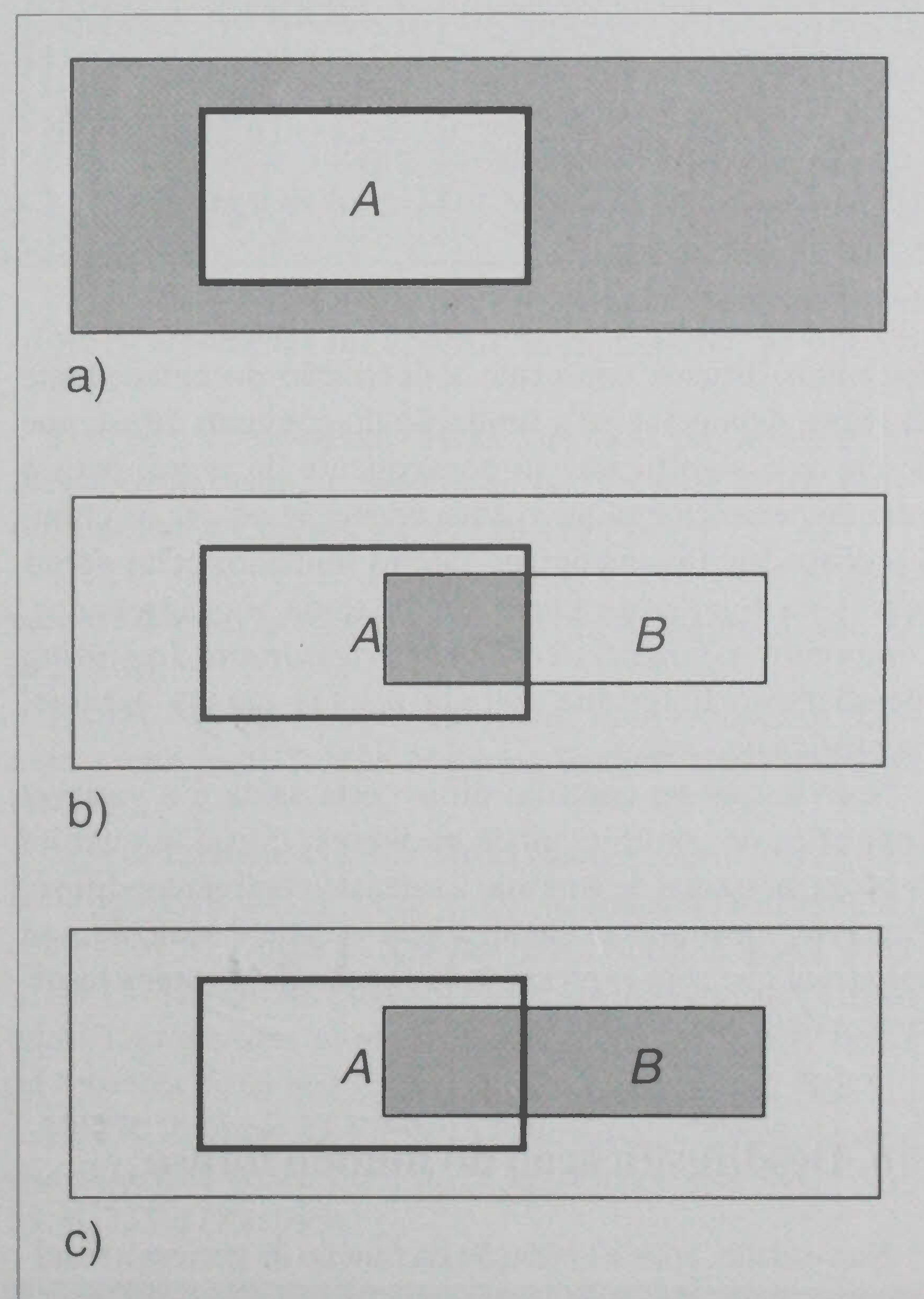


Fig. 4 - Visualização esquemática das operações clássicas pelo diagrama de Venn.

- a) Complemento ou negação (not): not A.
- b) Intersecção (and): A and B.
- c) União (or): A ou B.

QUADRO 1

Definições de operadores da lógica difusa: as operações aplicadas aos conjuntos difusos A e B originam o conjunto C da variável linguística x .

OPERADOR		DEFINIÇÃO	EQUIVALENTE LÓGICO
conectivo	negação	$\mu_C(x) = 1 - \mu_A(x)$	negação
	mínimo	$\mu_C(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$	and
	máximo	$\mu_C(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$	or
aritmético	produto	$\mu_C(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$	and
	soma (média)	$\mu_C(x) = \frac{1}{2} [\mu_A(x) + \mu_B(x)]$	or
ponderado $0 \leq w \leq 1$	and difuso	$\mu_C(x) = w \min [\mu_A(x), \mu_B(x)] + \frac{1-w}{2} [\mu_A(x) + \mu_B(x)]$	and
	or difuso	$\mu_C(x) = w \max [\mu_A(x), \mu_B(x)] + \frac{1-w}{2} [\mu_A(x) + \mu_B(x)]$	or
	min-max	$\mu_C(x) = w \min [\mu_A(x), \mu_B(x)] + (1-w) \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$	$\begin{cases} \text{and,} & \text{se } w = 1 \\ \text{or,} & \text{se } w = 0 \\ \text{soma,} & \text{se } w = 0,5 \end{cases}$
	expoente ponderante	$\mu_C(x) = [\mu_A(x) \mu_B(x)]^{1-w} \{ 1 - [1 - \mu_A(x)] [1 - \mu_B(x)] \}^w =$ $= [\mu_A(x) \mu_B(x)]^{1-w} [\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \mu_B(x)]^w$	$\begin{cases} \text{soma algébrica, se } w = 1 \\ \text{produto,} & \text{se } w = 0 \end{cases}$

conjuntos difusos conforme a descrição do antecedente da regra; depois faz-se a limitação do conjunto difuso que descreve o significado do conseqüente da regra, para o grau de pertença em que o antecedente se adapta às entradas crispadas; finalmente, os valores limitados pelas várias regras na função de pertença da saída são agregados, compondo a *função de pertença resultante* (resulting membership function), notada $\mu_{RES}(x)$ para a variável linguística de saída x .

Note-se que no controlo difuso esta saída é a variável linguística de controlo, ainda no mundo difuso, a qual irá concretizar o sinal de controlo à saída do controlador difuso. Para isso, mostra-se evidente a necessidade de calcular um valor real que seja expressivo da função de pertença resultante e daí obter a saída desejada.

6. Desdifusão do mundo difuso

Na verdade, após a obtenção da função de pertença resultante está criada a formatação necessária para terminar o processamento difuso, pela desdifusão, escolhendo criteriosamente o valor do suporte dessa função, que se converte depois no valor real do sinal de saída do sistema difuso.

Nesta fase derradeira do processamento começa-se por

fazer a *extração difusa* (fuzzy extraction), escolhendo o valor da variável linguística de saída do sistema, pela aplicação de um certo método de cálculo, entre os valores do universo de discurso dessa variável na função de pertença resultante. O problema resume-se à definição de uma metodologia adequada. São conhecidas várias propostas para o efeito, mas o método de maior consenso consiste no cálculo do "centro de gravidade" da função de pertença resultante.

Por seu lado, o actuador exige um sinal de controlo desafectado da normação feita no início da difusificação. Por isso, seguidamente realiza-se a *desnormação* (denormalization) com o coeficiente de escala naturalmente inverso do usado na normação. Assim, conclui-se pela obtenção do sinal real de controlo, que se aplica ao actuador da instalação controlada.

7. Desenvolvimento dos sistemas difusos

A lógica difusa deixa avaliar grandezas de saída num sistema difuso, em resposta a determinadas grandezas de entrada, usando certos operadores sobre conjuntos difusos. Pode-se, assim, proceder de maneira artificial com carácter mimético de muitos modos de decisão humana, os quais não são completamente objectivos, mas estão antes sujeitos a critérios subjectivos de natureza imprecisa ou vaga.

Nos mais variados domínios científicos e tecnológicos, surgem **casos com uma regra de inferência** para tomar decisões, geralmente por meio de ponderações. Por exemplo, a selecção de um engenheiro electrotécnico, para se integrar numa equipa de projecto, pode ser feita entre vários candidatos pela consideração de variáveis pertinentes, como formação, experiência, responsabilidade e independência, donde se afirma a seguinte regra de inferência como critério de selecção

if (formação or experiência)
and (responsabilidade or independência)
then (selecção)

atribuindo a cada candidato um grau de pertença nas variáveis eleitas, consoante expressar o curriculum vitae e as indicações de testes psicotécnicos ou de entrevistas; a aplicação dos operadores difusos fornece a conclusão para cada candidato, donde se extrai a indicação da candidatura mais adequada para preencher o lugar de trabalho. Observe-se que nestas circunstâncias, com uma única regra de inferência, convém usar operadores ponderados.

No âmbito do controlo de processos industriais, todavia, o desenvolvimento de sistemas difusos diz respeito a **casos com uma base de regras de inferência**, regras essas necessariamente formuladas com uma certa flexibilidade. A título exemplificativo, aponta-se o princípio geral do controlo difuso, pelas regras fundamentais

if (erro pequeno) then (grandeza de controlo grande) or
if (erro médio) then (grandeza de controlo média) or
if (erro grande) then (grandeza de controlo pequena)

sendo então preferível utilizar operadores aritméticos, afim de simplificar os cálculos. Os algoritmos de controlo são heurísticos, inserindo a experiência e a intuição dos operadores humanos nas regras linguísticas.

O desenvolvimento de sistemas difusos nas aplicações concretas depende muito da modulação consequente da prática dos peritos, sobretudo na difusificação e na elaboração da base de regras. Além disso, depende também da maneira como se definem os operadores difusos do motor de inferência e os métodos quantificadores na desdifusificação.

Para isso muito contribui a investigação científica e tecnológica dos sistemas difusos. O estudo da literatura básica, especialmente pela análise dos desenvolvimentos teóricos e práticos sucessivamente publicados, mostra-se importante para assimilar os conceitos essenciais e absorver a evolução do conhecimento, desde o estabelecimento da lógica difusa até às suas revelações pragmáticas. Esta estratégia conduz à pormenorização das técnicas apontadas na sistematização

apresentada, com vista ao desenvolvimento tecnológico de controladores difusos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. A. Zadeh, *Fuzzy sets*, Information and Control, 8, p. 338-353 (1965).
- [2] L. A. Zadeh, *Fuzzy algorithms*, Information and Control, 12, p. 94-102 (1968).
- [3] L. A. Zadeh, *Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes*, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, SMC-3, 28, p. 28-44 (1973).
- [4] E. H. Mamdani, *Application on fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant*, Proc. IEEE, 121, n.º 12, p. 1585-1588 (1974).
- [5] E. H. Mamdani, S. Assilian, *An experiment in linguistics synthesis with a fuzzy logic controller*, Int. J. Man-Machine Studies, Vol. 7, n.º 1, p. 1-3 (1975).
- [6] E. H. Mamdani, *Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers*, Int. J. Man-Machine Studies, 8, p. 669-678 (1976).
- [7] W. J. M. Kichert, A. R. N. Lemke, *Aplication of a fuzzy controller in a warm water plant*, Automatica, Vol. 12, p. 301-308 (1976).
- [8] R. M. Tong, *Analysis of fuzzy control algorithms using the relation matrix*, Int. J. Man-Machine Studies, 8, p. 679-689 (1976).
- [9] D. A. Rutherford, C. G. Bloone, *The implementation of fuzzy algorithms for control*, Proc. IEE, 64, p. 572-573 (1976).
- [10] M. A. Aizerman, *Some unsolved problems in the theory of automatic controls and fuzzy proofs*, IEEE Trans. on Automatic Control, 22, p. 116-118 (1977).
- [11] P. J. King, E. H. Mamdani, *Application of fuzzy control systems to industrial processes*, Automatica, Vol. 13, p. 235-242 (1977).
- [12] P. Martin Larsen, *Industrial applications of fuzzy logic control*, Int. J. Man-Machine Studies, Vol. 12, p. 3-10 (1980).
- [13] L. P. Holmblad, J. -J. Ostergaard, *Control of a cement kiln by fuzzy logic*, in "Fuzzy Information and Decision Processes", M. M. Gupta, E. Sanchez (eds), North-Holland, 1982.
- [14] T. Takagi, M. Sugeno, *Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control*, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 15, p. 116-132 (1985).
- [15] R. R. Yager, D. P. Filev, *On the issue of defuzzification and selection based on a fuzzy set*, Fuzzy Sets Syst., Vol. 55, p. 255-272 (1993).

**Leia a seguir a continuação desta série
de artigos sobre o moderno controlo inteligente**