

CONTROLADOR PID



SEL 364 - Controle Não Linear Aplicado
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo

07 de Abril de 2014

Prof^a. Vilma Alves de Oliveira

Controlador PID

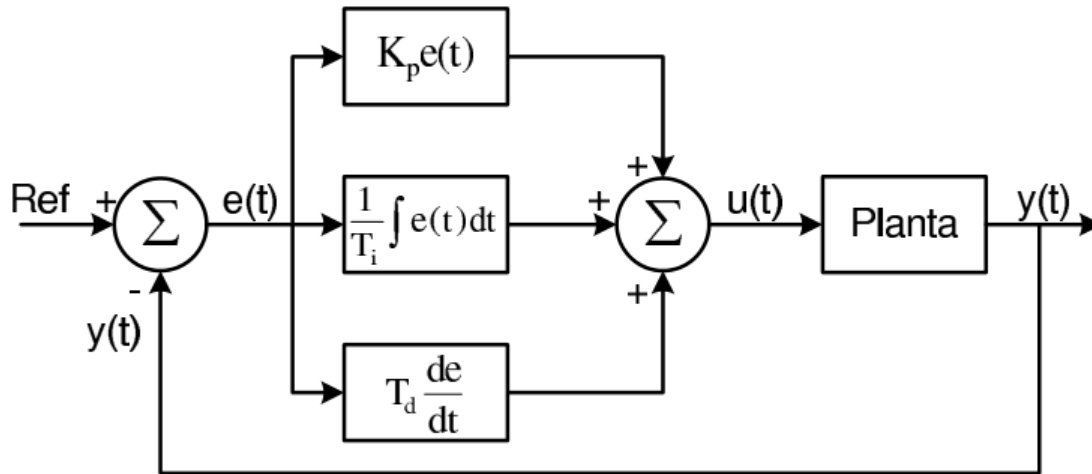


- **Vastamente utilizado em âmbito industrial**
- **Parâmetros de fácil ajuste**
- **Adequadamente robusto para ambientes industriais**
- **Possui variações como P, PD e PI**

Controlador PID



- Estrutura



- Equação geral

$$PID(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$



Contínua

$$PID(n) = K_p \left(e(n) + \frac{1}{T_i} \sum_{j=1}^n e(j) T_s + T_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T_s} \right)$$



Discreta

Controlador PID



- **Influência dos ganhos na planta**

| | Aumento K_p | Aumento $1/T_i$ | Aumento T_d |
|---------------------|---------------|-----------------|---------------|
| Tempo de subida | reduz | reduz | reduz pouco |
| Sobressinal | aumenta | aumenta pouco | reduz |
| Tempo de acomodação | aumenta | aumenta | reduz |
| Erro de regime | reduz pouco | reduz muito | muda pouco |
| Estabilidade | piora | piora | melhora |

Controlador PID



- **Sintonia Ziegler-Nichols**

Desenvolvido por John G. Ziegler e Nathaniel B. Nichols

Eficaz para processos químicos

Pode ser aplicado experimentalmente sem conhecer o modelo da planta/processo

Exige que o sistema seja levado ao limiar da estabilidade

O oscilador linear não é implementável na prática

Uma não linearidade tipo saturação para poder obter o sinal senoidal (ciclo limite)

Controlador PID



- **Sintonia Ziegler-Nichols**

Em malha fechada:

- 1) Ajustar **T_d** e **1/T_i** em zero
- 2) Aumentar lentamente o ganho **K_p** até que a saída do sistema oscile periodicamente. Se isso não acontecer esse método não se aplica
- 3) Seja **K_u** o ganho final e **P_u** o período da oscilação
- 4) Ajustar os parâmetros do controlador de acordo com a Tabela de sintonia ZN

Controlador PID



- **Sintonia Ziegler-Nichols**

Tabela de sintonia ZN

| Tipo do controlador | K_p | T_d | $1/T_i$ |
|---------------------|-----------|---------|----------|
| P | $0,5K_u$ | 0 | 0 |
| PD | $0,6K_u$ | $P_u/8$ | 0 |
| PI | $0,45K_u$ | 0 | $1,2P_u$ |
| PID | $0,6K_u$ | $P_u/8$ | $2P_u$ |

Controlador PID



- **Sintonia Manual – Hand-tuning**
 - 1) Ajustar **T_d** e **$1/T_i$** em zero
 - 2) Aumentar lentamente o ganho **K_p** para atingir a saída transitória desejada
 - 3) Aumentar **K_p** e ajustar **T_d** para reduzir o sobressinal
 - 4) Ajustar **$1/T_i$** para eliminar o erro de regime
 - 5) Repetir o passo 3 até **K_p** atingir o maior valor possível

Controlador Fuzzy



SEL 364 - Controle Não Linear Aplicado
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo

07 de Abril de 2014

Prof^a. Vilma Alves de Oliveira

Controlador Fuzzy



- **Opera em todo o universo de discurso do sistema fuzzy**
- **Capaz de inserir não linearidades nas ações de controle**
- **Possui variações como P, PD, PIncremental e PD+I**

Controlador Fuzzy



- **Proporcional**

- Produz sobressinal
- Simples

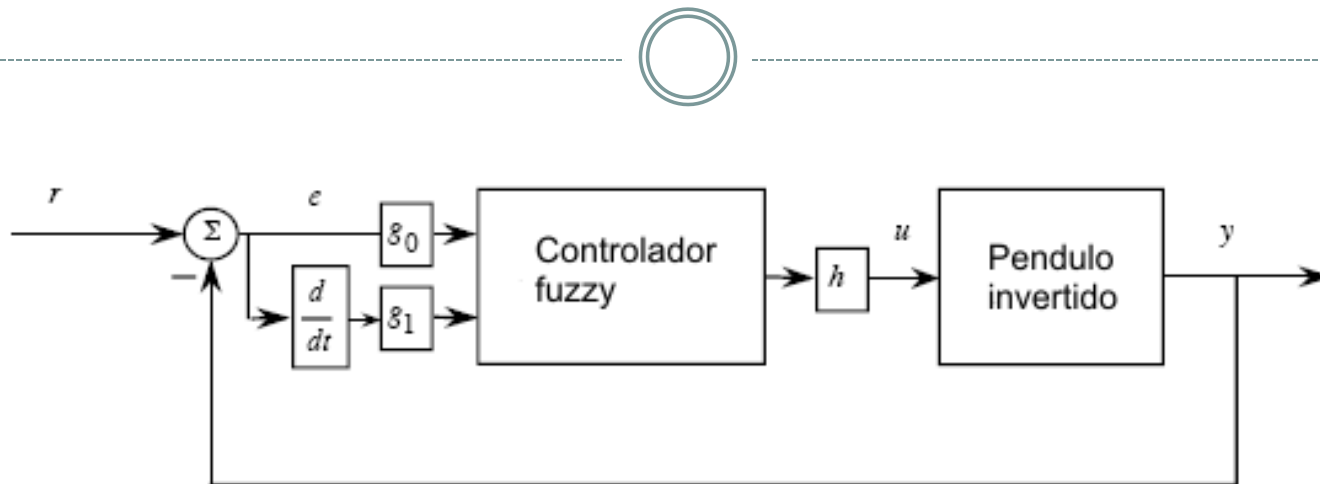
- **Derivativo**

- Reduz sobressinal
- Aumenta a sensibilidade ao ruído
- Apresenta pequeno erro de regime

- **Integrativo**

- Necessário caso ainda existir um pequeno erro
- É difícil escrever regras
- Implementado externamente
- (Fuzzy PD+I ou Fuzzy PD Incremental)

Controlador Fuzzy



Escolher:

- ➔ Funções de pertinência (universo de discurso, forma e parâmetros das funções)
- ➔ Ganhos
- ➔ Regras
- ➔ Sistema fuzzy:
 - And: mínimo, Or: máximo
 - Operadores de implicação e agregação
 - Defuzzificação: CDA

Controlador Fuzzy



- Funções de pertinência

Tipo

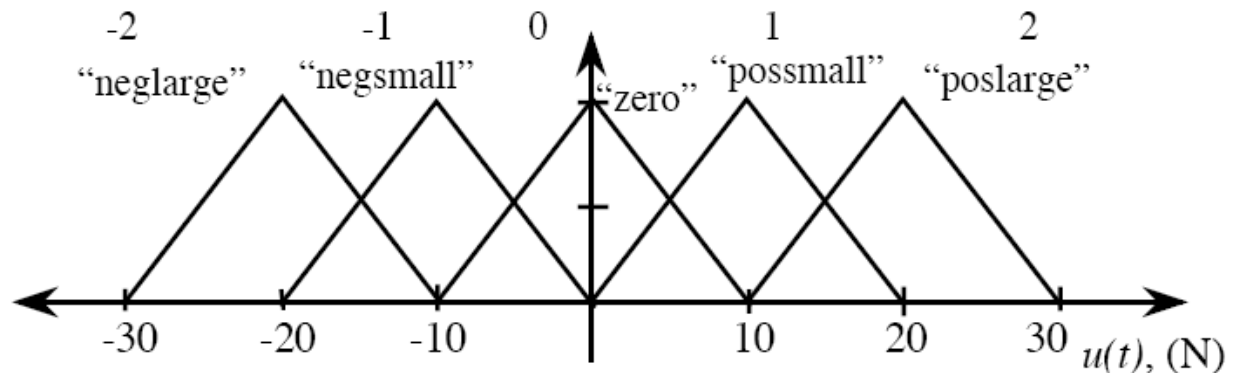
- Triangular
- Gaussiana → suaviza a resposta do sistema fuzzy

Posicionamento

- Linear → espaçamento linear entre as funções de pertinência

$i = -2, 1, 0, 1, 2$

Centros $c^i = 10 * i$



Controlador Fuzzy



→ Não linear

Exemplo

Centros:

$$c^i = 5 * \text{sign}(i) i^2$$

$$c^i = 5i^3$$

Centros próximos a origem são menor espaçados que funções distantes da origem.

Efeito: Se o erro/variação do erro indicam proximidade da referência, então a força de entrada da planta não precisa ser tão grande, mas, se o erro e a variação do erro são grandes, a força precisa ser também muito grande para que o pêndulo retorne rapidamente mais próximo a posição desejada.

Efeito no desempenho: Robustez a grandes perturbações

- **Universo de discurso**

Faixa de variação do erro, da derivada do erro e da saída do controlador

Controlador Fuzzy



- **Regras**

n entradas

m funções de pertinência

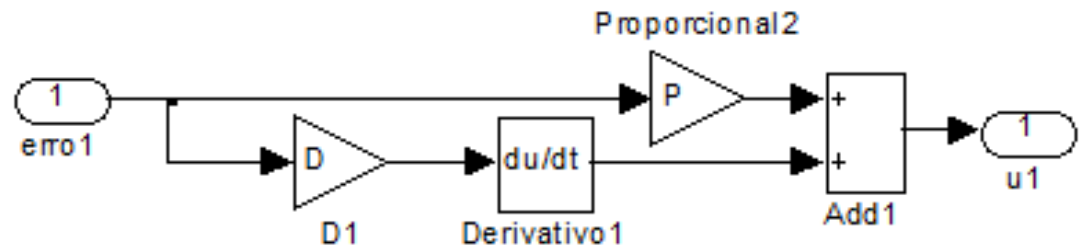
m^n regras

$$e(t) = r - y(t)$$

$$r = 0 \text{ (e } dr(t)/dt = 0)$$

$$e = -y$$

$$de(t)/dt = -dy/dt$$



Obtenção das regras

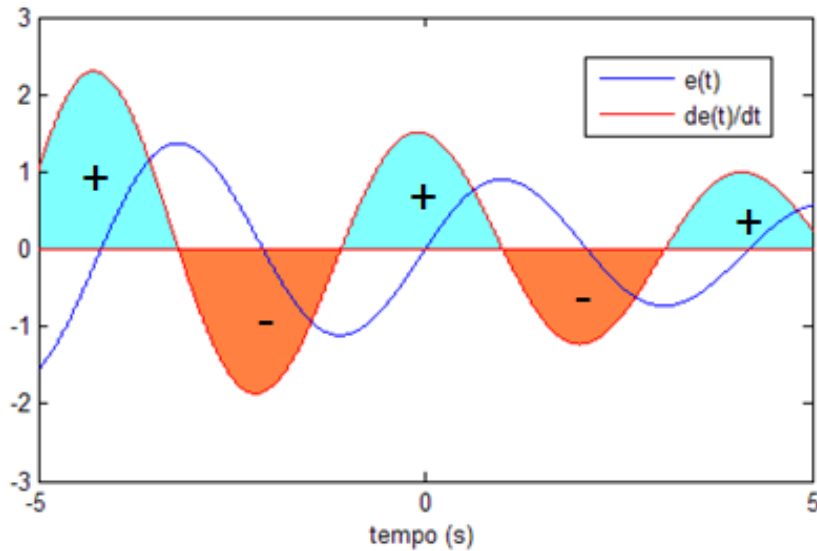
→ Extrair de um PD/Controlador Clássico

Controlador Fuzzy



- Regras**

Análise do sistema físico



Exemplo de base de regras

| | | Erro | | |
|------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | Negativo | Zero | Positivo |
| Variação do Erro | Negativo | Negativo | Negativo | Zero |
| | Zero | Negativo | Zero | Positivo |
| | Positivo | Zero | Positivo | Positivo |

$\text{Erro} = \text{referência} - \text{saída atual}$

| | $E(t) < 0$ (Saída > Ref) | $E(t) = 0$ (Saída = Ref) | $E(t) > 0$ (Saída < Ref) |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $De(t)/dt < 0$ | Erro diminuindo | Erro diminuindo | Erro diminuindo |
| $De(t)/dt = 0$ | Mínimo | Sistema parado | Máximo |
| $De(t)/dt > 0$ | Erro aumentando | Erro aumentando | Erro aumentando |

Controlador Fuzzy



- **Escalonamento**

→ Escalonamento da entrada (g):

→ $g = 1$, sem alteração nas entradas

→ $g < 1$, corresponde à expansão das funções de pertinência em fator de $1/g$.

→ $g > 1$, corresponde à contração das funções de pertinência em um fator $1/g$.

→ Escalonamento da saída (h):

→ $h = 1$, sem alteração na saída

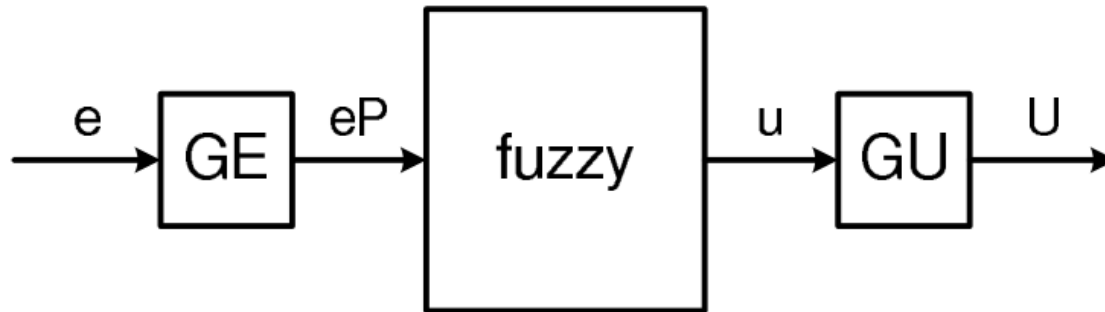
→ $h < 1$, corresponde à situação em que as funções de pertinência são uniformemente contraídas pelo fator h

→ $h > 1$, corresponde a situação em que as funções de pertinência são uniformemente “expandidas” pelo fator h .

Controlador Fuzzy



- **Fuzzy P**



$$\begin{aligned} U(n) &= \text{fuzzy}(GE * e(n)) * GU \\ &= (GE * e(n)) * GU \\ &= GE * GU * e(n) \end{aligned}$$

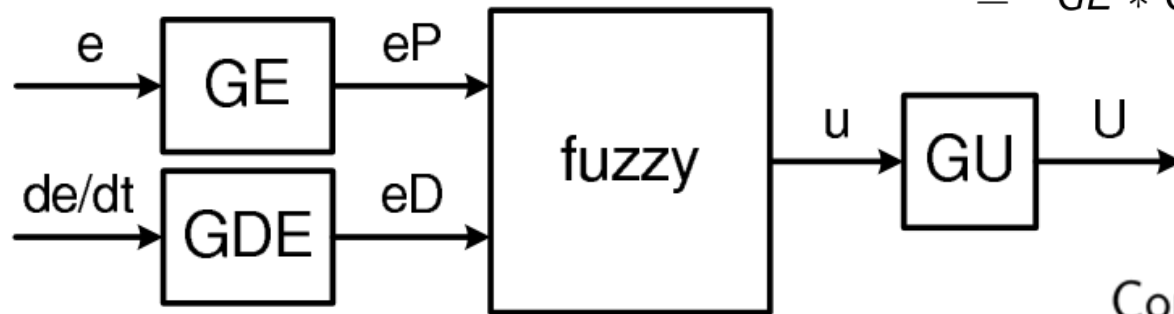
Comparando com o PID discreto:

$$GE * GU = K_p$$

Controlador Fuzzy



- **Fuzzy PD**



$$\begin{aligned} U(n) &= \text{fuzzy}(GE * e(n), GDE * \dot{e}(n)) * GU \\ &= (GE * e(n) + GDE * \dot{e}(n)) * GU \\ &= GE * GU(e(n) + \frac{GDE}{GE} \dot{e}(n)) \end{aligned}$$

Comparando com o PD discreto:

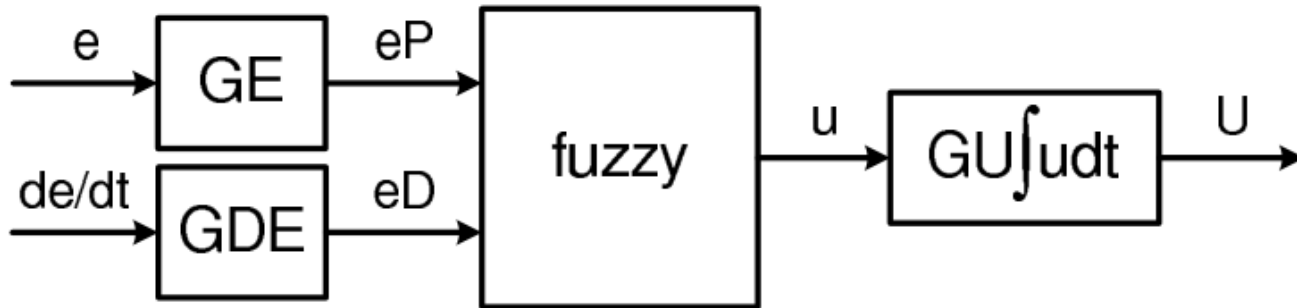
$$\begin{aligned} \dot{e}(n) &= \frac{e(n) - e(n-1)}{T_s} \\ U(n) &= GE * GU(e(n) + \frac{GDE}{GE} \dot{e}(n)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} GE * GU &= K_p \\ \frac{GDE}{GE} &= T_d \end{aligned}$$

Controlador Fuzzy



- **Fuzzy PIncremental**



$$\begin{aligned}
 U(n) &= \sum_{j=1}^n (u(j) * GU * T_s) \\
 &= \sum_{j=1}^n (\text{fuzzy}(GE * e(j), GDE * \dot{e}(j)) * GU * T_s) \\
 &= \sum_{j=1}^n (GE * e(j) + GDE * \dot{e}(j)) * GU * T_s \\
 &\dots \\
 &= GDE * GU * \left[\frac{GE}{GDE} \sum_{j=1}^n (e(j) * T_s) + e(n) \right]
 \end{aligned}$$

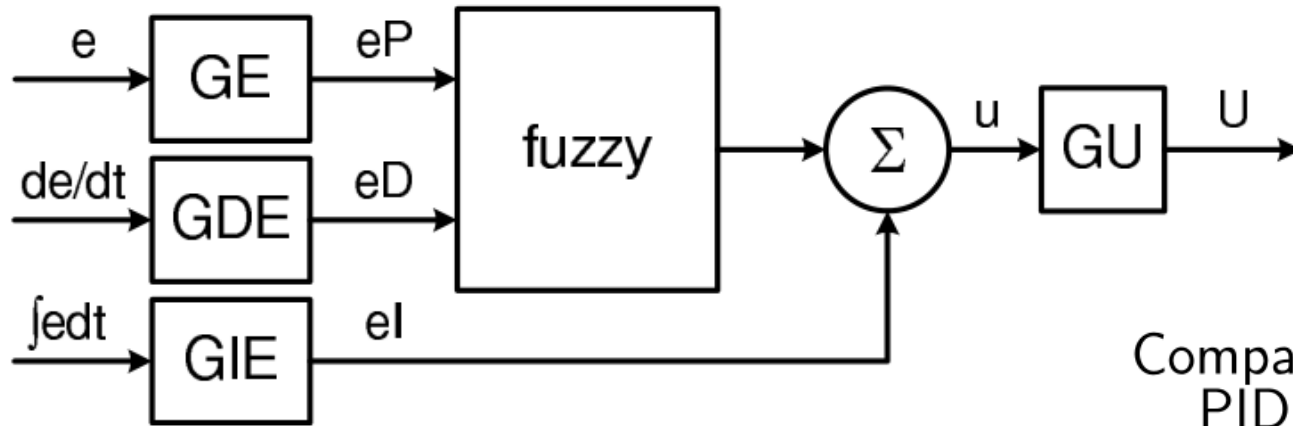
Comparando com o PI discreto:

$$\begin{aligned}
 GDE * GU &= K_p \\
 \frac{GE}{GDE} &= \frac{1}{T_i}
 \end{aligned}$$

Controlador Fuzzy



- **Fuzzy PD+I**



Comparando com o PID discreto:

$$GE * GU = K_p$$

$$\frac{GDE}{GE} = K_d$$

$$\frac{GIE}{GE} = K_i$$

$$U(n) = \left[GE * e(n) + GDE * \dot{e}(n) + GIE * \sum_{j=1}^n e(j) T_s \right] * GU$$

$$= GE * GU * \left[e(n) + \frac{GDE}{GE} * \dot{e}(n) + \frac{GIE}{GE} * \sum_{j=1}^n e(j) T_s \right]$$

Controlador Fuzzy



- **Resumo das características**

| Controlador | Vantagem | Desvantagem |
|-------------|-----------------------|-------------------|
| Fuzzy P | Simples | Muito simples |
| Fuzzy PD | Menos sobressinal | Sensível ao ruído |
| Fuzzy PInc. | Remove erro de regime | Lento |
| Fuzzy PD+I | Tudo em um | Efeito “windup” |

Controlador Fuzzy



- **Resumo das transferências dos ganhos**

| Controlador | K_p | $1/T_i$ | T_d |
|-------------|----------|----------|----------|
| Fuzzy P | $GE*GU$ | | |
| Fuzzy PD | $GE*GU$ | | GDE/GE |
| Fuzzy PInc. | $GDE*GU$ | GE/GDE | |
| Fuzzy PD+I | $GE*GU$ | GIE/GE | GDE/GE |

Controlador Fuzzy



- **Sintonia de Controladores Fuzzy**

- 1) Sintonizar um PID
 - Sintonia manual
 - Ziegler Nichols
 - Outros métodos clássicos
- 2) Inserir um Fuzzy PD+I
- 3) Transferir os ganhos do PID (se não houver saturação a resposta deverá ser parecida)
- 4) Adicionar não linearidades ao controlador
- 5) Realizar o ajuste fino: ajuste manual
 - GE → melhora a taxa de subida
 - GCE → amortece o sobressinal
 - GIE → remove o erro de regime

Controlador Fuzzy



- **Adicionando não linearidades ao controlador**

Exemplo:

Uma entrada e uma saída

Regras:

SE erro é Neg ENTÃO Saída é Neg

SE erro é Zero ENTÃO Saída é Zero

SE erro é Pos ENTÃO Saída é Pos

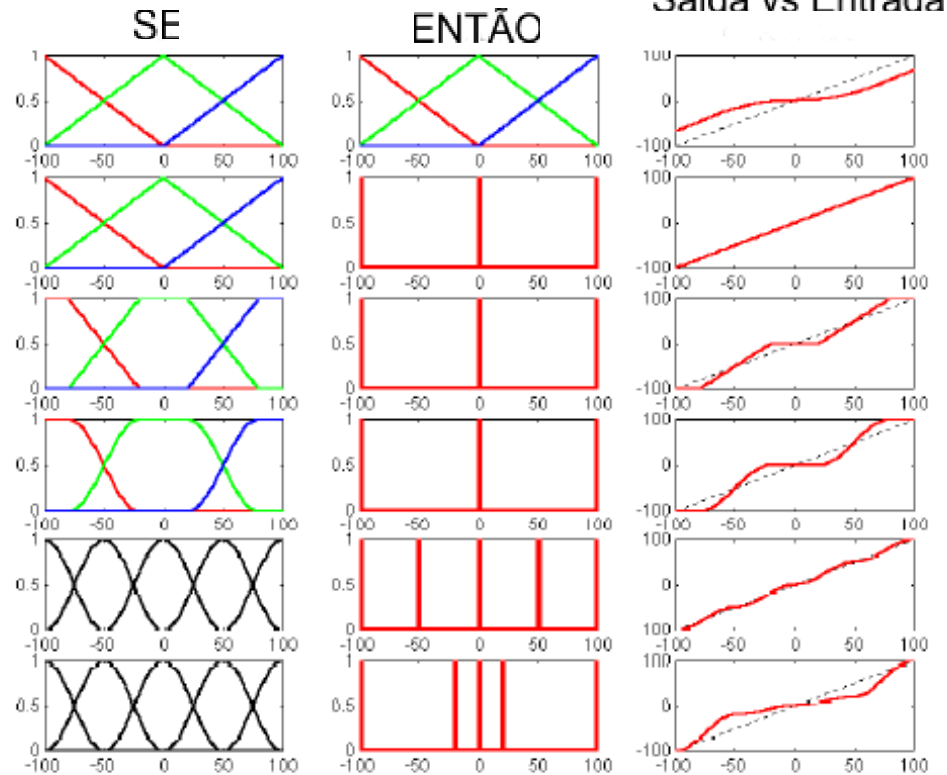
Operadores

Max: produto

Implicação: min

Agregação: probor

Defuzzificação: CDA



Modificando a forma das funções de pertinência
Modificando a disposição das funções de pertinência

Controlador Fuzzy



- **Ajuste Fino**

GE:

$$|e_{max} * GE| = |Universo_{m\acute{a}x}|$$

FuzzyPD → GE afeta ganhos proporcionais e derivativos. Tão grande quanto possível reduz problemas com ruído.

FuzzyIncremental → GE grande controle incremental torna-se menos estável (ganho integrativo alto).

FuzzyPD+I → GE tão grande quanto possível porém ao custo do aumento do ganho integrativo

Controlador Fuzzy



- **Ajuste Fino**

GCE:

$$|e_{max} * GE| = |Universo_{máx}|$$

FuzzyPD → tão pequeno quanto possível para evitar problemas com ruído. Altera o ganho derivativo sem afetar o ganho proporcional.

FuzzyIncremental → aumento de GCE diminui ação integrativa e incrementa o ganho proporcional, manter GCE tão grande quanto possível para preservar a estabilidade.

FuzzyPD+I → incremento em GCE incrementa o ganho derivativo. Manter tão pequeno quanto possível

Controlador Fuzzy



- **Ajuste Fino**

GCU / GU:

Afetam o ganho proporcional, deve ser tão grande quanto possível sem criar muito sobressinal. Se pequeno, o sistema pode apresentar-se lento, se muito grande o sistema pode tornar-se instável.

Controlador Fuzzy



- **Ajuste Fino**

Sintonia manual PD+I

- 1) Ajustar GE (ou GCE) de acordo com o tamanho e universo do passo de modo a explorar o universo de discurso completamente.
- 2) Remover a ação integral e derivativa fazendo $GIE=GCE=0$. Ajustar GU de modo a obter a resposta desejada, ignorando qualquer valor final de offset.
- 3) Aumentar o ganho proporcional por meio de GU, e ajustar o ganho derivativo por meio de GCE para amortecer o sobressinal.
- 4) Ajustar o ganho integral por meio de GIE para remover o valor final de offset.
- 5) Repetir o procedimento até fazer GU tão grande quanto possível.

Bibliografia



- Jantzen, J. , Tuning of Fuzzy PID Controllers, Technical University of Denmark: Dept. of Automation, 1998 (<http://fuzzy.iau.dtu.dk/tedlib.nsf/htmlmedia/library.html>)
- Jantzen, J. , Design of Fuzzy Controllers, Technical University of Denmark: Dept. of Automation, 1998 (<http://fuzzy.iau.dtu.dk/tedlib.nsf/htmlmedia/library.html>)
- Passino K. M., Yurkovich S., Fuzzy Control, Addison Wesley Longman, 1998