



## Exercício 4

### *Acionamento não-linear de um pêndulo*

#### Objetivo:

Utilização de *Lógica Nebulosa* para projetar um acionamento que *linearize* um pêndulo, i.é, o pêndulo deve apresentar uma resposta dinâmica ao degrau em regime permanente que "independa" do ponto de operação. Isto será feito de duas formas, formulando regras empíricas que compensem a força da gravidade (exercício 5) e numa segunda parte (exercício 6), treinando um sistema ANFIS que *aprende* a linearização exata do processo.

#### Introdução:

Um pêndulo simples é um sistema dinâmico de 2ª ordem que, sujeito à força da gravidade, tem um comportamento dinâmico (tempo de subida, sobre-passo, tempo de acomodação) dependente do ponto de operação. A simulação deste sistema para um controlador proporcional pode ser vista nas figuras 1 e 2. Se este pêndulo fosse um manipulador robótico que deposita CI's numa placa de circuito impresso, haveria um grande erro no posicionamento dos mesmos.

Para um posicionamento preciso do pêndulo pode se utilizar um controlador "inteligente", isto é, neste caso, um controlador que considere também a posição angular do pêndulo e não apenas o erro da posição angular. Este "conhecimento" é justamente o que distingue um especialista de um leigo.

Um controlador fuzzy pode ser sintonizado definindo-se um conjunto de regras heurísticas do tipo "IF regraA AND regraB Then ConsequenciaC" ou através do treinamento dos parâmetros que definem um sistema de inferência fuzzy utilizando a metodologia ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Neste trabalho computacional serão implementados e comparados estes dois métodos.

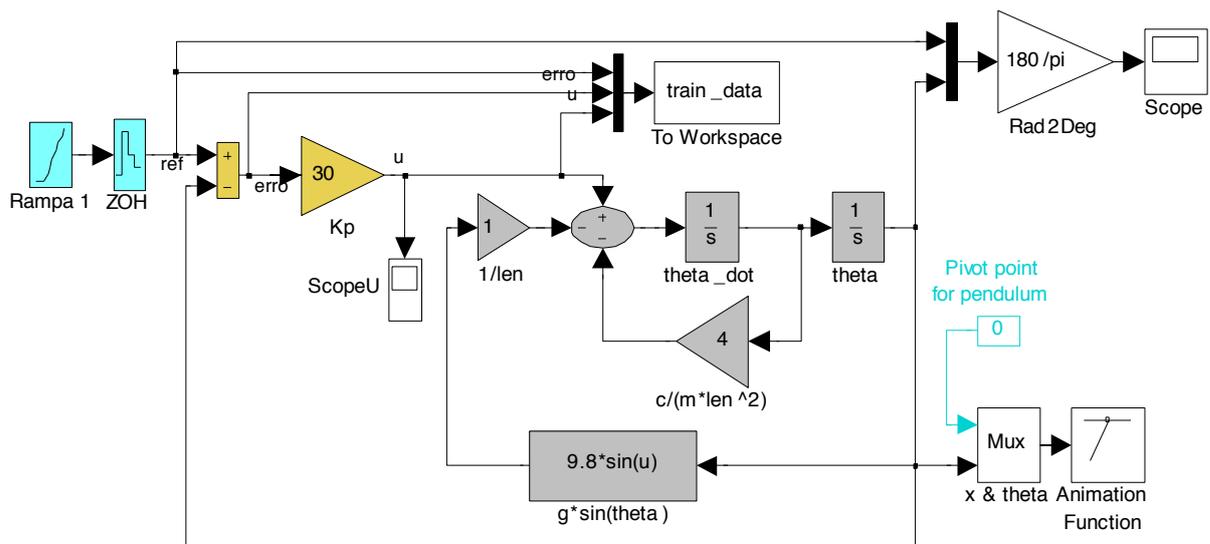


Figura 1 – Simulação não-linear do controle proporcional de um pêndulo (pendulo.mdl).

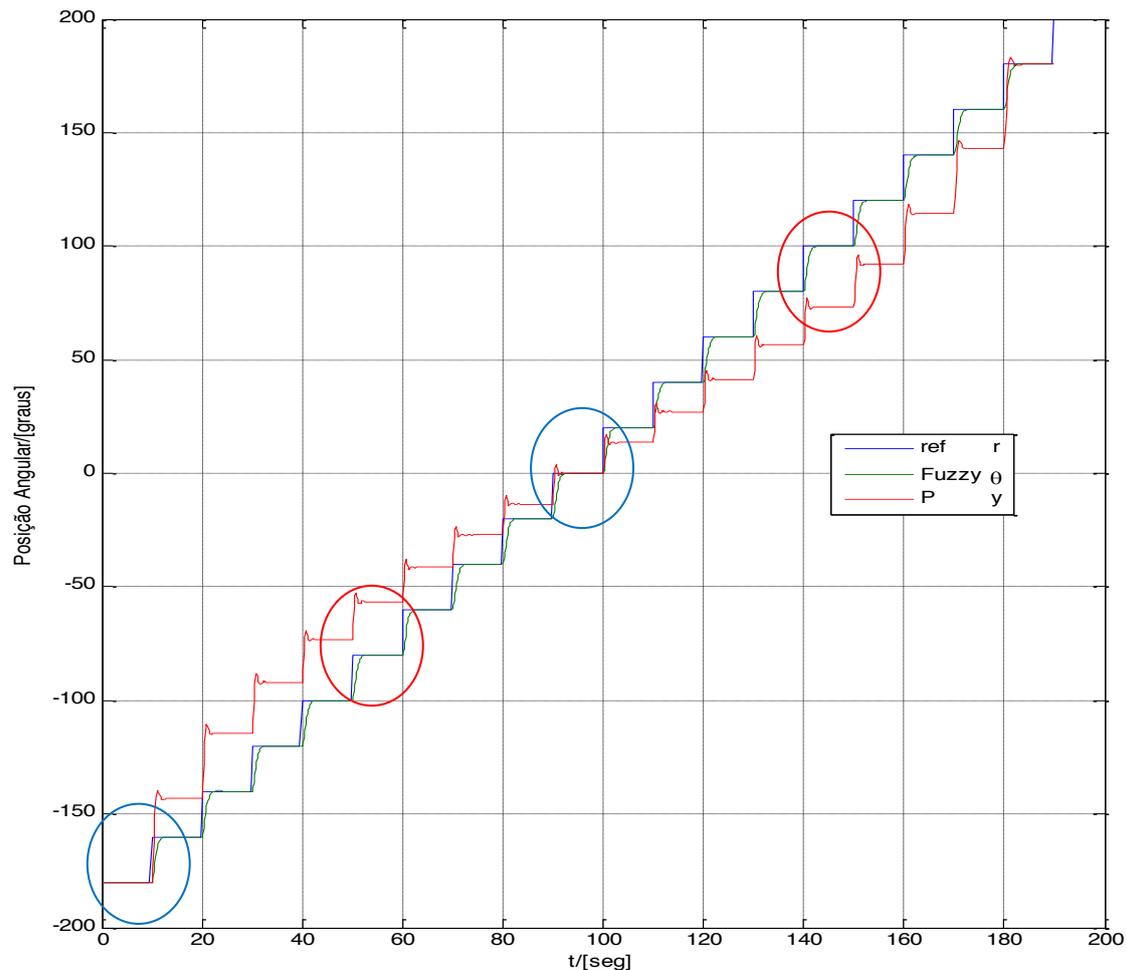


Figura 2 – Simulação do controlador proporcional e do controlador fuzzy.

Nota-se um grande erro de posicionamento, que é dependente do ponto de operação. Ângulos de referência em torno de  $\pm 90^\circ$  apresentam os maiores erros, enquanto valores em torno de  $0^\circ$  e  $\pm 180^\circ$  não tem erro em regime permanente.

O controlador fuzzy (ver figura 3) apresenta resultados uniformes ao longo de toda a faixa de operação.

## Parte 1

### Procedimento:

1. Substituir no arquivo pendulo.mdl, o controlador proporcional  $K_p^*$  por um controlador fuzzy de duas entradas.
2. Considerar o universo de discurso (faixa dos valores de  $r$  e  $y$ )  $[-225^\circ \ 225^\circ] \times [-225^\circ \ 225^\circ]$ .
3. A escolha do tipo de função de pertinência é livre (trapezoidal, gbell, triangular etc.)
4. Criar funções de pertinência fuzzy para a referência ( $r$ ) e a posição ( $y$ ), tendo o acionamento ( $u$ ) como saída.
5. Criar um conjunto de regras para o acionamento associadas aos diversos pontos de operação do pêndulo.
6. Ajustar regras e conjuntos fuzzy para obter uma resposta aproximadamente linear.
7. Mostrar a superfície de controle obtida.
8. Apresentar as curvas no tempo da resposta à seqüência de degraus (ver [pendulo.mdl](#)).

\* Visando diferenciar os trabalhos, cada aluno deverá utilizar os dois últimos dígitos de sua matrícula, como  $K_p$ . Se o valor for menor que 20, somar 20 a estes dígitos.

Obs: Quanto menos conjuntos de pertinência e regras, mais "fácil" será encontrar uma "boa" solução.



## Parte II

### Procedimento:

1. Criar um conjunto de treinamento, teste e validação para o pêndulo (figura 3).  
 Particionar o sinal PT com 80% para treinamento(t), e 10% para teste(e) e validação(v): (t t t t e t t t v ...).  
 Para tanto editar a simulação da figura 3 para capturar os valores de (r, y, u).
2. Criar conjuntos FIS do tipo Sugeno com função de pertinência de saída linear utilizando as 6 configurações mostradas na tabela 1 a seguir. Utilizar funções de pertinência gbell.
3. Treinar o conjunto de regras utilizando o método de treinamento híbrido.  
 Qual o número de épocas necessário para atingir o objetivo de erro em cada caso?
4. Mostre para o melhor resultado obtido a superfície de controle e a simulação do pêndulo com o controle *Fuzzy*.
5. Compare os resultados do controle ANFIS, com o FIS do tipo Mamdani do Exercício 5.

Tabela 1 – Configurações de parâmetros a serem utilizadas no treinamento ANFIS do pêndulo.

Configuração Grid Part:	1	2	3
MF#	3 3	4 4	5 5

Configuração Sub Clustering:	4	5	6
Range of influence	.2	.5	1

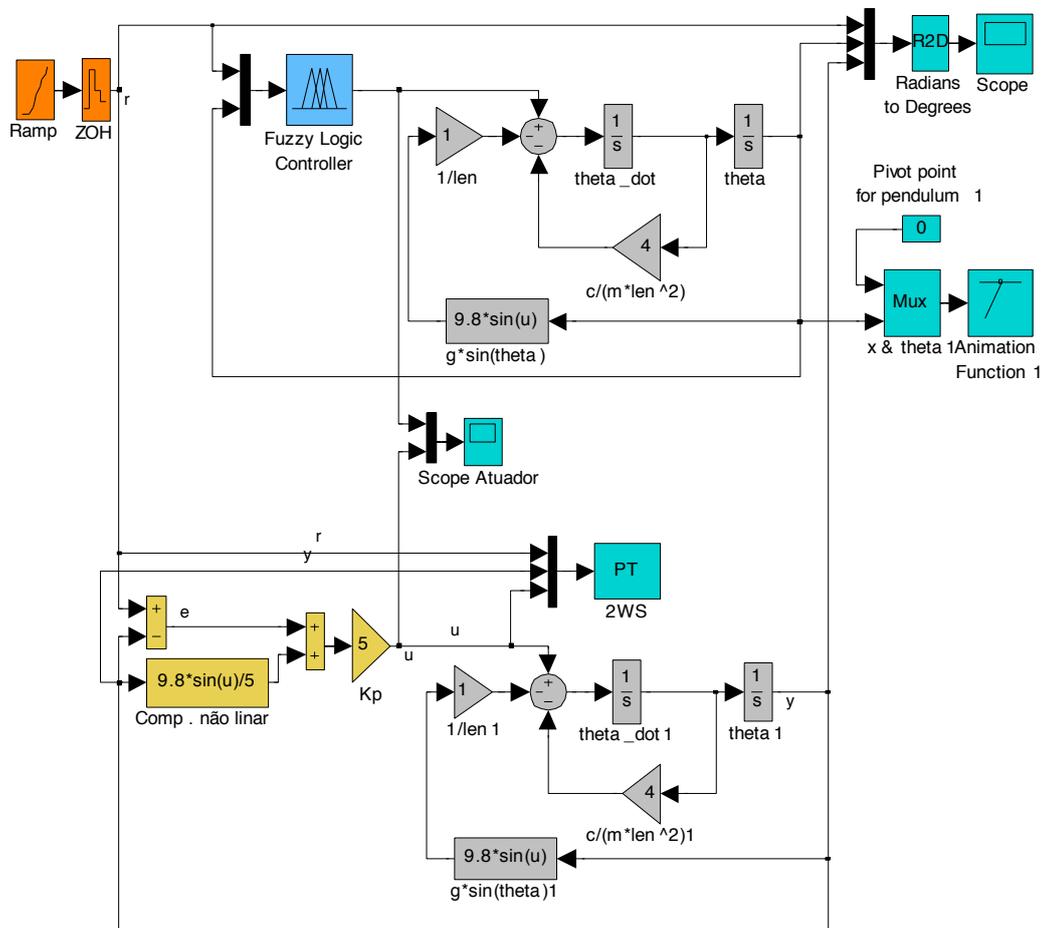


Figura 3 – Simulação do controlador Fuzzy e arranjo que implementa a linearização exata do pêndulo.

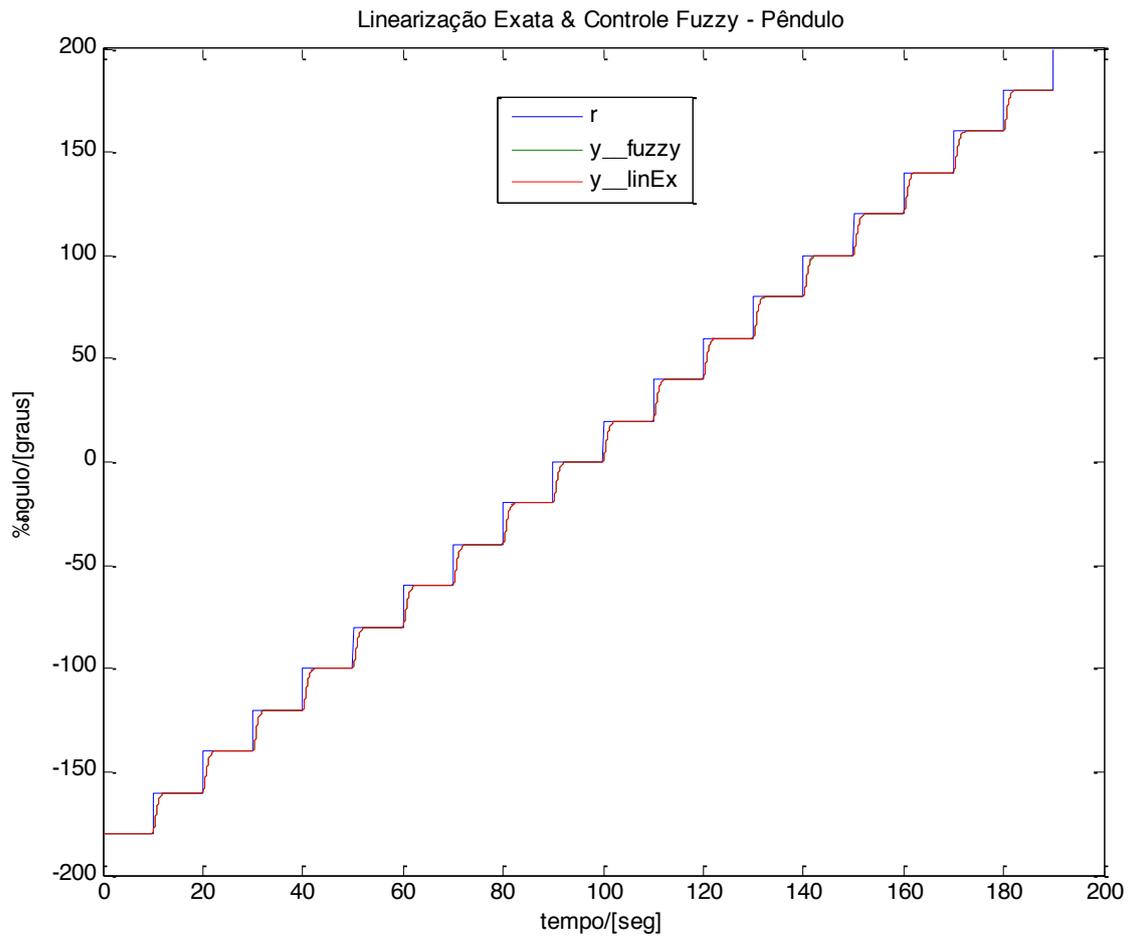


Figura 4 – O controlador ANFIS segue com erro mínimo o “especialista”, o controle via linearização exata.

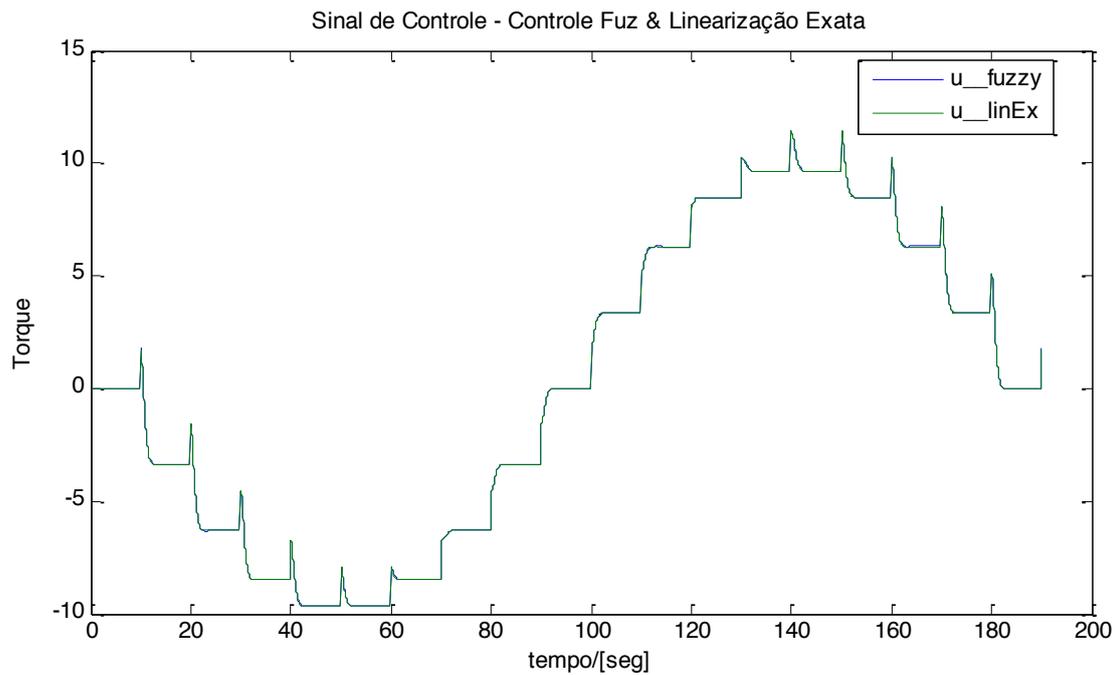


Figura 5 – Sinal de controle do controlador ANFIS e calculado via linearização exata.