

N2

Prof. Claudinei Dias (Ney)

OTIMIZAÇÃO DE CONTROLE DE PÊNDULO INVERTIDO SOBRE UM CARRO

Objetivo:

- Desenvolver 3 (três) sistemas de controle distintos (FIS - Sistema de Inferência Fuzzy, Genético-Fuzzy e Neuro-Fuzzy) para gerenciar a estabilidade de um pêndulo invertido montado sobre um carro.

Observações:

- O escopo deste trabalho contempla os seguintes tópicos: **Rede Neural Artificial MLP (*Multi-layer Perceptron*)**, **Algoritmos Genéticos** e **Sistema de Inferência Fuzzy**.
- O trabalho deve ser realizado em grupos com no mínimo 3 e no máximo 6 integrantes (inserir nome completo de cada integrante). Exceções devem ser solicitadas antecipadamente.

Etapas do Projeto:

1. Desenvolvimento do Sistema FIS:

- a) Utilize a modelagem descrita nas páginas seguintes para implementar o FIS, considerar os conjuntos de pertinência e regras fuzzy apresentadas para controlar o pêndulo invertido.
- b) Implemente o sistema FIS utilizando as variáveis de entrada definidas (ângulo e velocidade angular do pêndulo, posição e velocidade linear do carro).
- c) Teste o sistema FIS para avaliar seu desempenho no controle do pêndulo.

2. Desenvolvimento do Sistema Genético-Fuzzy:

- a) Implemente um modelo que combina Algoritmos Genéticos ao sistema FIS da etapa 1 para otimizar as regras e parâmetros fuzzy.
- b) Atualize a modelagem descrita nas páginas seguintes para contemplar o Sistema Genético-Fuzzy.
- c) Execute iterações de otimização genética, avaliando cada geração de regras fuzzy em sua eficácia no controle do pêndulo.
- d) Teste o sistema Genético-Fuzzy otimizado e compare seu desempenho com o sistema FIS original.

3. Desenvolvimento do Sistema Neuro-Fuzzy:

- a) Implemente um modelo que combina Lógica Fuzzy com uma Rede Neural Artificial MLP (*Multi-layer Perceptron*) para aprimorar a decisão de controle.
- b) Atualize a modelagem descrita nas páginas seguintes para contemplar o Sistema Neuro-Fuzzy.
- c) Treine a rede neural com dados históricos ou simulados, ajustando os pesos para otimizar o desempenho do controle.
- d) Teste o sistema Neuro-Fuzzy e compare sua eficiência com as versões FIS e Genético-Fuzzy.

4. Comparação das Três Soluções:

- a) Avalie e compare as soluções com base em critérios como precisão do controle, adaptabilidade a mudanças nas condições do pêndulo/carro, eficiência em tempo de resposta, e capacidade de lidar com incertezas e variações. Realize a análise comparativa dos três sistemas (qualitativas e quantitativas), incluindo comparações de desempenho.
- b) Discuta as vantagens e desvantagens de cada sistema, destacando em quais cenários específicos um pode ser mais adequado do que os outros.

Modelagem do Problema para implementação do Sistema FIS:

Para calcular a saída de um FIS (*Fuzzy Inference System*) dadas as entradas, deve-se percorrer seis etapas:

1. Determinar um conjunto de regras fuzzy;
2. Fuzzyficar as entradas usando as funções de associação de entrada;
3. Combinar as entradas fuzzyficadas de acordo com as regras fuzzy para estabelecer uma “força” de regra;
4. Encontrar a consequência da regra combinando a força da regra e a função de pertinência da saída (se for um FIS Mamdani);
5. Combinar as consequências para obter uma distribuição de saída;
6. Defuzzyficar a distribuição da saída (esta etapa aplica-se somente se uma saída crisp for necessária).

Depois de determinar as entradas e saídas apropriadas para sua aplicação, há três etapas para projetar os parâmetros para um sistema fuzzy:

1. Especifique os conjuntos fuzzy a serem associados a cada variável;
2. Decida o que as regras fuzzy vão ser;
3. Especifique a forma das funções de pertinência.

PARTE 1: implementação pêndulo invertido sobre o carro

Podemos começar a projetar um sistema fuzzy subdividindo-se o problema em duas variáveis de entrada, referentes ao pêndulo invertido (ângulo do pêndulo e velocidade angular), em conjuntos de pertinência.

O ângulo pode ser descrito como:

1. Inclinado para a esquerda (N)
2. Vertical (Z)
3. Inclinado para a direita (P)

A velocidade angular pode ser descrita como:

1. Deslocando-se para a esquerda (N)
2. Parado (Z)
3. Deslocando-se para a direita (P)

Regras fuzzy para inclinação e velocidade angular

1. IF pêndulo está inclinado à esquerda AND pêndulo está movendo para a esquerda THEN empurre o carro fortemente para a esquerda;
2. IF pêndulo está inclinado à esquerda AND pêndulo não está movendo THEN empurre o carro para a esquerda;
3. IF pêndulo está inclinado à esquerda AND pêndulo está movendo para a direita THEN não empurre o carro;
4. IF pêndulo não está inclinado AND pêndulo está movendo para a esquerda THEN empurre o carro levemente para a esquerda;
5. IF pêndulo não está inclinado AND pêndulo não está movendo THEN não empurre o carro;
6. IF pêndulo não está inclinado AND pêndulo está movendo para a direita THEN empurre o carro levemente para a direita;
7. IF pêndulo está inclinado à direita AND pêndulo está movendo para a esquerda THEN não empurre o carro;
8. IF pêndulo está inclinado à direita AND pêndulo não está movendo THEN empurre o carro para a direita;
9. IF pêndulo está inclinado à direita AND pêndulo está movendo para a direita THEN empurre o carro fortemente para a direita.

matriz de regras

		θ		
		N	Z	P
$\dot{\theta}$	N	NL	NS	Z
	Z	NM	Z	PM
	P	Z	PS	PL

legenda

N – negativo

Z – zero

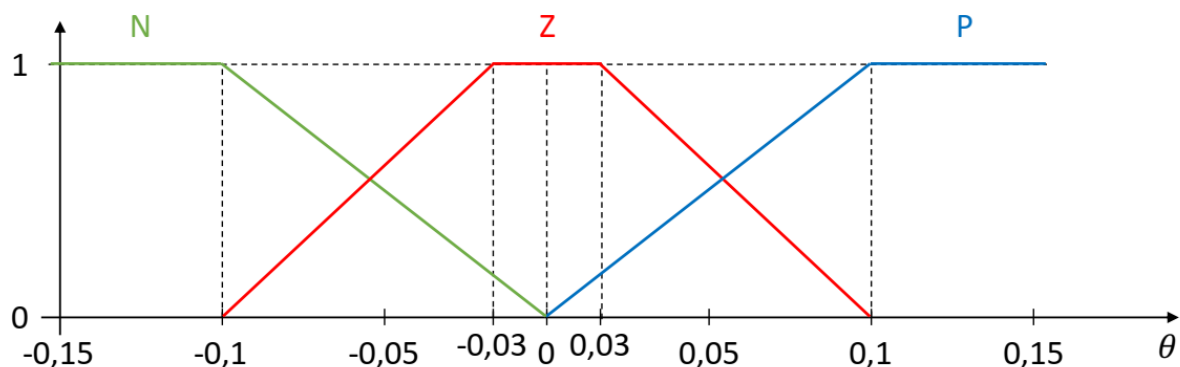
P – positivo

L – grande

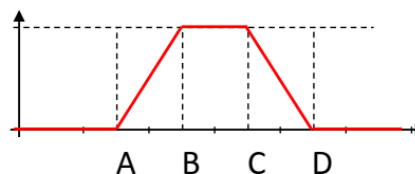
M – médio

S – pequeno

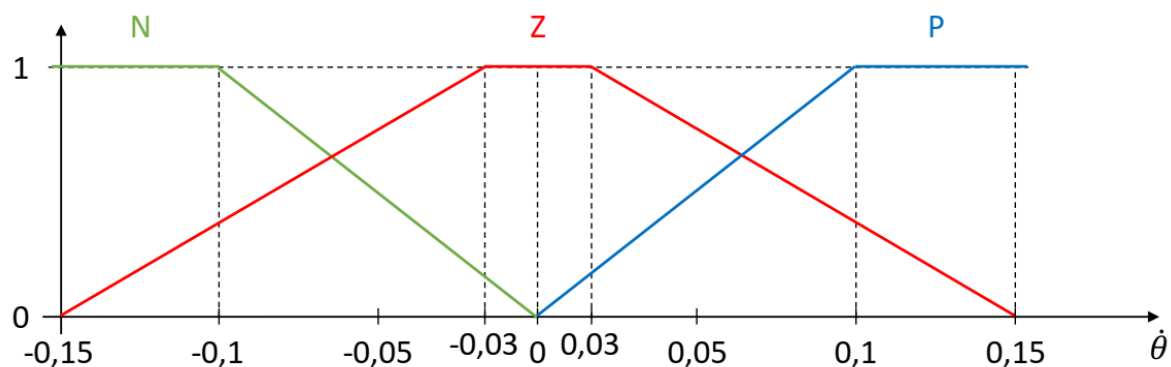
Funções de Pertinência (FPs) da inclinação do pêndulo



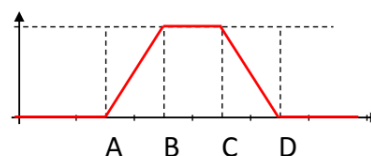
vértices trapezoidais			
	N	Z	P
A	-	-0,1	0
B	-	-0,03	0,1
C	-0,1	0,03	-
D	0	0,1	-



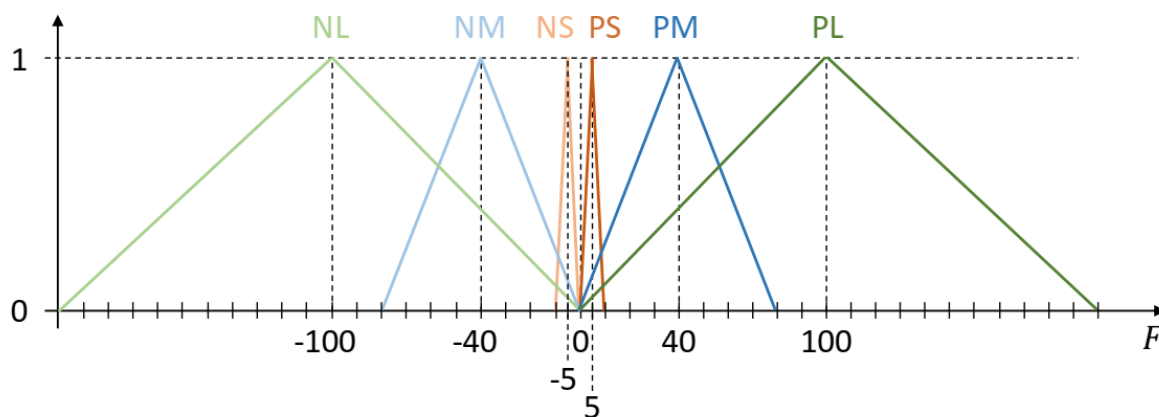
FPs da velocidade angular do pêndulo



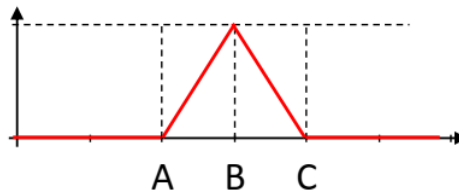
vértices trapezoidais			
	N	Z	P
A	-	-0,15	0
B	-	-0,03	0,1
C	-0,1	0,03	-
D	0	0,15	-



FPs da saída do pêndulo



vértices trapezoidais							
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
A	-200	-80	-10	0	0	0	0
B	-100	-40	-5	0	5	40	100
C	0	0	0	0	10	80	200



PARTE 2: implementação pêndulo invertido sobre o carro

Separadamente, pode-se também subdividir o problema em outras duas variáveis de entrada, referentes ao carro (posição e velocidade linear do carro), em conjuntos de pertinência.

A posição pode ser descrita como:

1. À esquerda (N)
2. Centro (Z)
3. À direita (P)

A velocidade pode ser descrita como:

1. Deslocando-se para a esquerda (N)
2. Parado (Z)
3. Deslocando-se para a direita (P)

Regras fuzzy para posição e velocidade do carro

1. IF o carro está na esquerda AND carro está indo para a esquerda THEN empurre o carro fortemente para a direita;
2. IF o carro está na esquerda AND carro não está movimentando THEN empurre o carro para a direita;
3. IF o carro está na esquerda AND carro está indo para a direita THEN não empurre o carro;
4. IF o carro está centralizado AND carro está indo para a esquerda THEN empurre um pouco o carro para a direita;
5. IF carro está centralizado AND carro não está movimentando THEN não empurre o carro;
6. IF carro está centralizado AND carro está indo para a direita THEN empurre um pouco o carro para a esquerda;
7. IF o carro está na direita AND carro está indo para a esquerda THEN não empurre o carro;
8. IF o carro está na direita AND carro não está movimentando THEN empurre o carro para a esquerda;
9. IF o carro está na direita AND carro está indo para a direita THEN empurre o carro fortemente para a esquerda.

matriz de regras		x		
		N	Z	P
\dot{x}	N	PL	PS	Z
	Z	PM	Z	NM
	P	Z	NS	NL

legenda

N – negativo

Z – zero

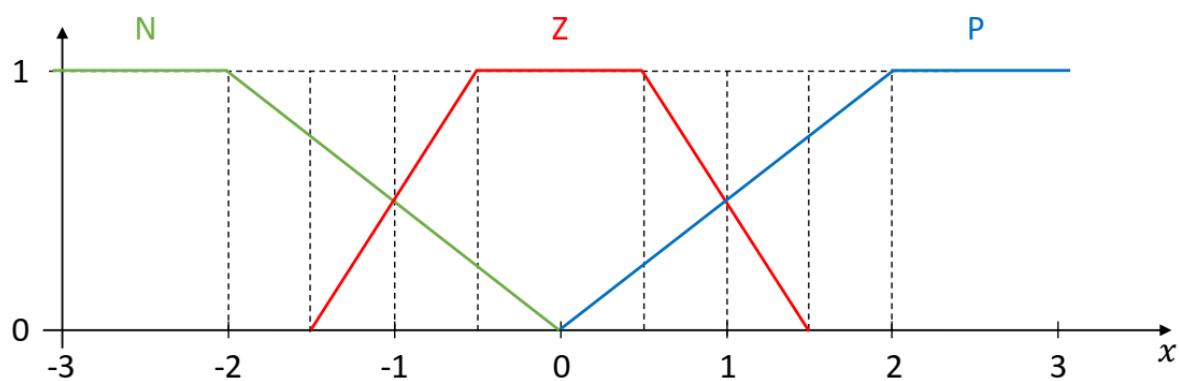
P – positivo

L – grande

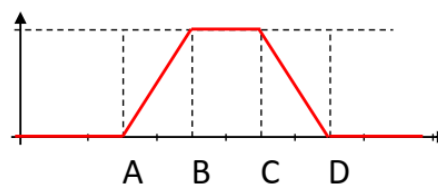
M – médio

S – pequeno

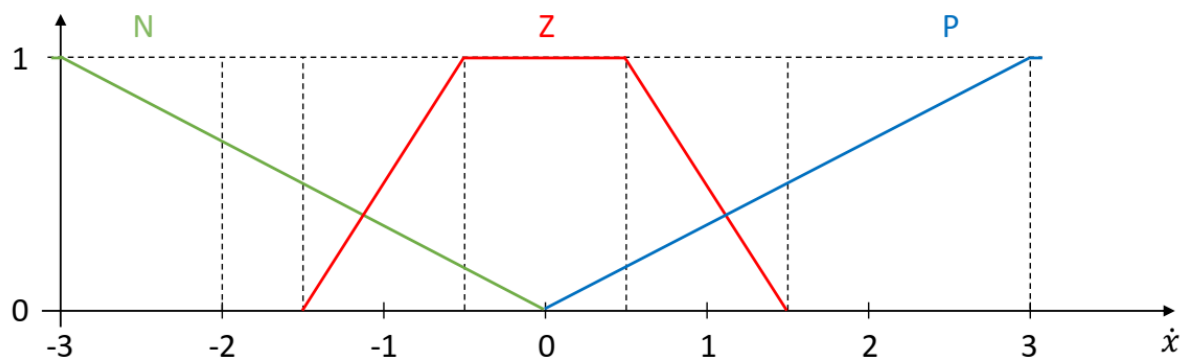
FPs da posição do carro



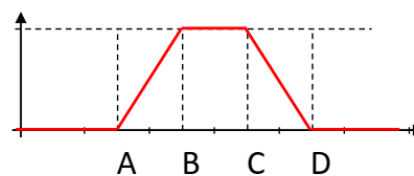
vértices trapezoidais			
	N	Z	P
A	-	-1,5	1
B	-	-0,5	2
C	-2	0,5	-
D	0	1,5	-



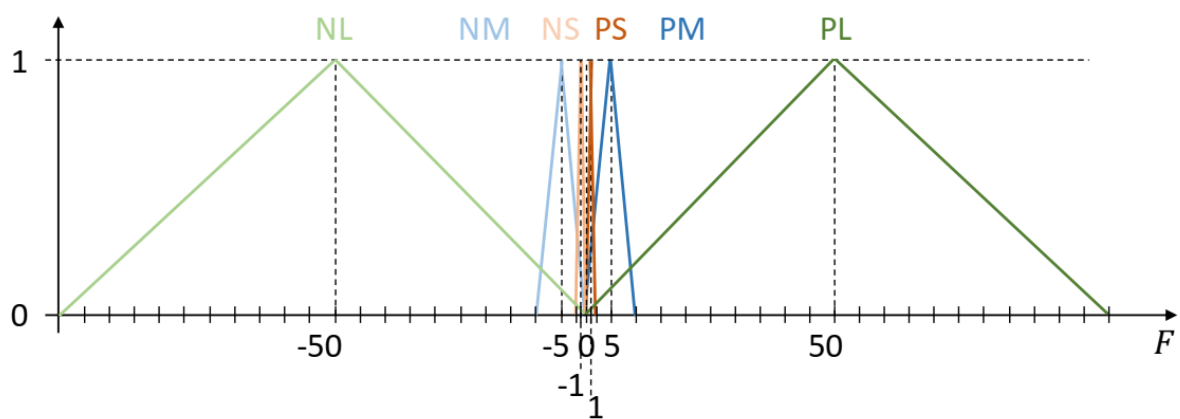
FPs da velocidade do carro



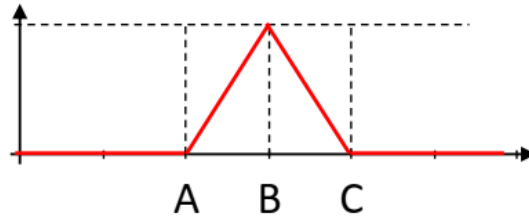
vértices trapezoidais			
	N	Z	P
A	-	-1,5	0
B	-	-0,5	3
C	-3	0,5	-
D	-0	1,5	-



FPs da saída do carro



vértices trapezoidais							
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
A	-100	-10	-2	0	0	0	0
B	-50	-5	-1	0	1	5	50
C	0	0	0	0	2	10	100



Defuzzificação

Weighted average

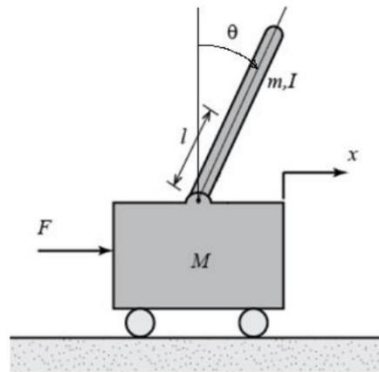
$$z^* = \frac{\sum \mu_C(\bar{z})z}{\sum \mu_C(\bar{z})}$$

Modelo de simulação

Pêndulo invertido sobre o carro

$$\ddot{x} = \frac{m_p l [\dot{\theta}^2 \sin(\theta) - \ddot{\theta} \cos(\theta)] + F}{m_c + m_p}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{m_p l [g \sin(\theta) - \ddot{x} \cos(\theta)]}{I + m_p l^2}$$



- $\theta \rightarrow$ ângulo do pêndulo
- $\dot{\theta} \rightarrow$ velocidade angular do pêndulo
- $x \rightarrow$ posição do carro
- $\dot{x} \rightarrow$ velocidade do carro
- $l = 0,3 \text{ m} \rightarrow$ tamanho do pêndulo
- $m_c = 0,5 \text{ kg}, m_p = 0,2 \text{ kg}, g = 9,8 \text{ m/s}^2$
- $I = 0,006 \text{ kg.m}^2 \rightarrow$ momento de inércia do pêndulo
- $F \rightarrow$ força aplicada ao carro (em Newtons)

Loop de simulação

- $\ddot{x} = \text{calc}\ddot{x}(F, \theta_{old}, \dot{\theta}_{old})$
- $\dot{x} = \dot{x}_{old} + h\ddot{x}$
- $x_{new} = x_{old} + h\dot{x}$
- $\ddot{\theta} = \text{calc}\ddot{\theta}(\ddot{x}, \theta_{old}, \dot{\theta}_{old})$
- $\dot{\theta} = \dot{\theta}_{old} + h\ddot{\theta}$
- $\theta = \theta_{old} + h\dot{\theta}$
- $h = 0,02$ (sugestão)

loop de controle
calcula força (fuzzy)
in: estado
out: força
atualiza o sistema
in: força
out: estado