

# Sistemas Inteligentes para Controle de Veículos Espaciais Autônomos Baseados em Paradigmas de Inteligência Computacional a Exemplo de Lógica Nebulosa

Marcelo Módolo<sup>1</sup>, Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Doutorado em Computação Aplicada – CAP  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

<sup>2</sup>Divisão de Energia Nuclear  
Instituto de Estudos Avançados – IEAv/CTA

marmodolo@hotmail.com, guimaraes@ieav.cta.br

**Abstract.** *This work was created and implemented in MATLAB a fuzzy control system for an inverted pendulum model, understood as a system of attitude control of satellites. Using a PID controller, also implemented in MATLAB, an experiment was done to compare the results of these two controllers and was observed a better result for the dynamic behavior of the system controlled by fuzzy strategy in several respects. Besides this experiment, some articles on fuzzy systems used in control of satellites was analyzed and the results of the experiments described in these articles show both good robustness, rapidity and good dynamic performance of the Fuzzy controller.*

**Resumo.** *Nesse trabalho foi criado e implementado no MATLAB um sistema nebuloso de controle para um modelo do pêndulo invertido que pode ser entendido como um sistema de controle de atitude de satélites. Usando um controlador PID, também implementado em MATLAB, foi feito um experimento para comparação dos resultados desses dois controladores e observado um resultado melhor do comportamento dinâmico para o sistema controlado pela estratégia nebulosa em vários aspectos. Além desse experimento, foram analisados alguns artigos sobre sistemas nebulosos usados no controle de satélites e os resultados dos experimentos, descritos nesses artigos, comprovam a boa robustez, rapidez e bom desempenho dinâmico do controlador Nebuloso.*

**Palavras-chave:** *Sistemas Nebulosos, Controlador Inteligente, Sistemas de Controles de Satélites, Pendulo Invertido.*

## 1. Introdução

Os sistemas dos veículos espaciais estão se tornando cada vez mais complexos e autônomos, transferindo a tomada de decisão para bordo das aeronaves, fazendo com que sejam capazes de tomar decisões e definir passos a serem realizados a partir de objetivos, não sendo mais necessário que as ordens sejam detalhadas no solo o que diminui a comunicação necessária e proporciona decisões em tempo real de acordo com as condições encontradas pela aeronave (KUCINSKIS, 2012).

O aumento dessa autonomia leva a necessidade de construção de sistemas inteligentes que possam tomar decisões diante de situações que se apresentem à

aeronave. Segundo GUAN, ZHANG e LIU (2011) os satélites modernos não são mais um sistema não linear simples, eles se tornaram sistemas com não linearidade alta, forte acoplamento, variação no tempo e incerteza.

Os sistemas de controle convencionais utilizam a modelagem matemática do processo a ser controlado, geralmente utilizando equações diferenciais e assumindo que variações nas entradas produzem variações proporcionais nas saídas, ou seja, assumindo que o processo é linear. Já os sistemas de controle inteligentes são capazes de atuar sobre um processo não linear fornecendo respostas apropriadas a situações específicas mesmo que sejam novas e inesperadas (SIMÕES e SHAW, 2007).

Existem muitas pesquisas sobre a utilização de Sistemas Nebulosos nos controles de satélite porque esses sistemas apresentam boa robustez, rapidez e bom desempenho dinâmico (NARAYANA, BONU e RAO, 2011). Algumas dessas pesquisas, descritas a seguir, comparam um controlador Nebuloso com um controlador convencional.

CHENG, SHU e CHENG (2009) afirmam que o controlador nebuloso que construíram foi superior aos controladores clássicos existentes no satélite ROCSAT-1 da China porque não requer ajustes e tampouco computação complicada, o que o torna mais fácil de ser implementado em um microcomputador.

ZOTES e PEÑAS (2010) compararam o controlador nebuloso construído por eles comparados com um controlador convencional e mostraram que o controlador nebuloso apresentou um comportamento melhor porque eliminou os picos iniciais de resposta e reduziu os erros, o que resultou em propulsão necessária mais baixa e esforço de controle mais suave, reduzindo o consumo de combustível e, conseqüentemente, aumentando o tempo de duração das missões.

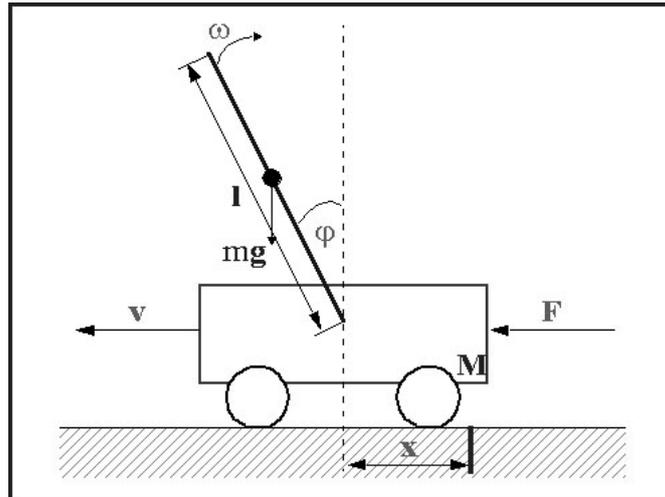
NARAYANA, BONU e RAO (2011) compararam o desempenho de um controlador Nebuloso com um controlador PID para controle de atitude de satélite. Os resultados foram que o controlador nebuloso consegue eliminar oscilações perigosas e oferecer uma operação suave no período de transição, além de obter um erro de estabilização baixo. Eles afirmam que esses resultados indicam que o controlador Nebuloso pode ser uma melhor escolha para controle do satélite.

A atitude do satélite é um dos subsistemas que pode ser controlado por sistemas inteligentes. Esse subsistema pode ser entendido como um pêndulo invertido, no qual a intensidade das forças aplicadas perpendicularmente busca estabilizar o pêndulo, de maneira semelhante ao que pode ser feito com a atitude do satélite.

Nesse trabalho foi criado um sistema de controle inteligente para o pêndulo invertido para comparar os resultados obtidos com os resultados de um controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) já existente. Como plataforma para o experimento foi usado o MATLAB, na qual já estavam implementados um modelo do pêndulo invertido e um controlador PID, que estabiliza com sucesso o pêndulo. O Controlador Nebuloso criado também foi implementado no MATLAB para comparação dos resultados desses dois controladores.

## **2. Modelo do Pêndulo Invertido**

O pêndulo considerado nesse trabalho tem seu movimento restrito somente no plano, ou seja, somente pode se movimentar para a esquerda e para a direita. O sistema de controle para o equilíbrio vertical do pêndulo é feito através da aplicação de uma força no carrinho. A Figura 1 representa o sistema.



**Figura 1: Pêndulo invertido sobre um carrinho.**

A descrição dos símbolos utilizados na modelagem do sistema é mostrada na Tabela 1.

**Tabela 1: Símbolos utilizados na modelagem.**

Símbolo	Descrição
$l$	Metade do comprimento da haste do pêndulo
$m_p$	Massa da haste
$m_c$	Massa do carrinho
$b$	Coefficiente da força viscosa
$g$	Aceleração da gravidade
$\theta$	Ângulo do pêndulo em relação a vertical
$\omega$	Velocidade angular do pêndulo
$I$	Momento de inércia do pêndulo
$x$	Posição do carrinho
$t$	Instante de tempo
$v$	Velocidade do carrinho

A modelagem matemática foi feita utilizando a equação de Euler-Lagrange.

### 3. Controlador Nebuloso

A construção de um sistema nebuloso é um processo iterativo que precisa de ajustes nos seus parâmetros durante os testes iniciais, pois o conhecimento do sistema está baseado no conhecimento do especialista que muitas vezes é intuitivo e difícil de ser representado. No entanto, a construção de uma primeira versão de um sistema nebuloso pode ser feita seguindo os passos (RESENDE, 2003):

1. Definição das variáveis nebulosas de entrada e saída e dos valores linguísticos de cada uma delas.
2. Criação das regras de produção que compõe a base de conhecimento.
3. Definição do conjunto universo de cada variável nebulosa.
4. Criação das funções de pertinência dos conjuntos nebulosos.

5. Definição do operador de implicação das regras de produção.
6. Definição da técnica de desnebulização que será utilizada.

### 3.1. Variáveis Nebulosas

Foram usadas três variáveis de entrada e uma variável de saída para implementação desse controlador nebuloso. Seguem as variáveis usadas e seus respectivos valores linguísticos:

Erro ( $e$ ) e Variação do Erro ( $\Delta e$ ):

- NG = Negativo Grande
- NP = Negativo Pequeno
- ZE = Zero
- PP = Positivo Pequeno
- PG = Positivo Grande

Velocidade ( $V$ ):

- POS = Positivo
- NEG = Negativo

Força ( $u$ ):

- NG = Negativo Grande
- NM = Negativo Médio
- NP = Negativo Pequeno
- ZE = Zero
- PP = Positivo Pequeno
- PM = Positivo Médio
- PG = Positivo Grande

### 3.2. Base de Conhecimento

A base de conhecimento foi construída inicialmente com poucas regras, mas os testes mostraram a necessidade de completar as regras para todas as combinações de valores das entradas Erro e Variação do Erro.

Foram criadas apenas duas regras para a variável Velocidade porque o único objetivo dessas regras é fazer com que o carrinho diminua a velocidade depois que o Erro está estabilizado muito próximo de zero. Essa estabilização da velocidade é uma contribuição que foi desenvolvida para esse trabalho que não foi encontrada nos outros controles Nebulosos de pendulo invertido das referências consultadas.

A Tabela 2 mostra na forma tabular as regras criadas para a Base de Conhecimento.

**Tabela 2: Forma tabular do conhecimento usado pelo controlador.**

	$\Delta e = NG$	$\Delta e = NP$	$\Delta e = ZE$	$\Delta e = PP$	$\Delta e = PG$	V = POS	V = NEG
$e = NG$	$u = NG$	$u = NG$	$u = NG$	$u = NG$	$u = NM$		
$e = NP$	$u = NG$	$u = NM$	$u = NP$	$u = NP$	$u = NP$		
$e = ZE$	$u = NG$	$u = NP$	$u = ZE$	$u = PP$	$u = PG$	U = PP	U = NP
$e = PP$	$u = PP$	$u = NP$	$u = PP$	$u = PM$	$u = PG$		
$e = PG$	$u = PM$	$u = PG$	$u = PG$	$u = PG$	$u = PG$		

### 3.3. Conjunto Universo

Os valores do conjunto universo das variáveis nebulosas foram obtidos através da verificação das variações do sistema executado sem controle e com controle PID, e também através de vários testes empíricos com diferentes valores para os conjuntos.

- Erro:  $U = [-PI, PI]$  em %
- Variação do Erro:  $U = [-PI, PI]$  em %/ms
- Velocidade do Carrinho:  $U = [-50, 50]$  em m/s
- Força:  $U = [-100, 100]$  em N

### 3.4. Funções de Pertinência

As funções de pertinência foram construídas inicialmente com sete valores linguísticos para as variáveis: Erro, Variação do Erro e Força. Durante os testes percebeu-se que os valores médios (NM e PM) das variáveis de entrada não estavam influenciando nos resultados obtidos. Sendo assim, diminuiu-se para cinco valores para as variáveis: Erro e Variação do Erro: NG, NP, ZE, PP e PG.

### 3.5. Operador de Implicação

O operador de implicação utilizado neste trabalho foi o operador de Mandani Min (TSOUKALAS e UHRIG, 1997), definido conforme equação:

$$\varphi[\mu_A(x), \mu_B(y)] = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

Sendo que:

- $\varphi$ : operação de implicação
- $\mu$ : grau de pertinência
- A e B: conjuntos nebulosos
- min: valor mínimo

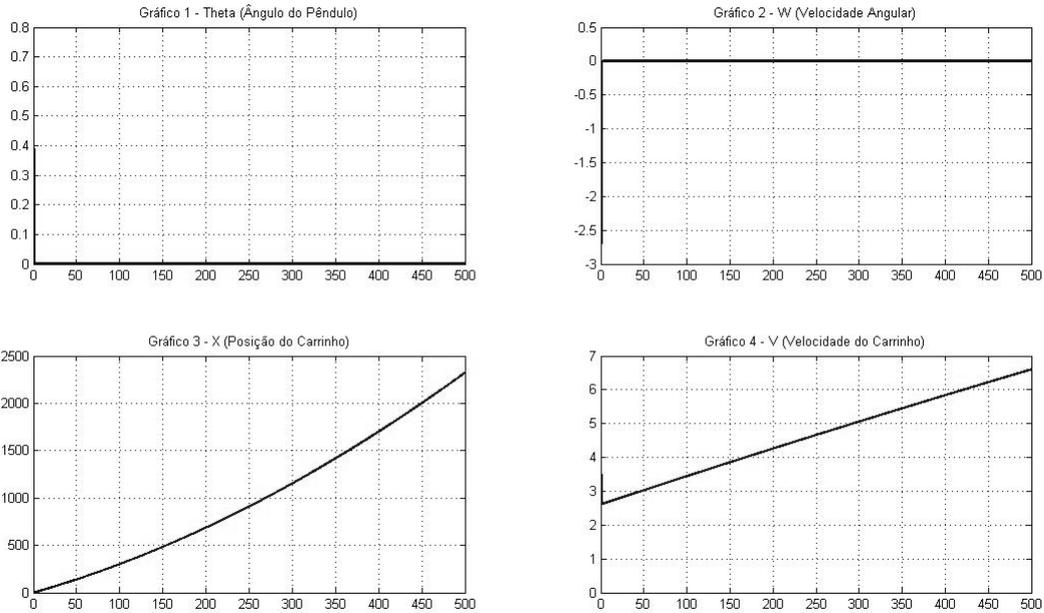
### 3.6. Técnica de Desnebulização

A técnica de desnebulização utilizada neste trabalho consiste em encontrar o centro de massa do conjunto nebuloso de saída, conhecido como Centro de Área.

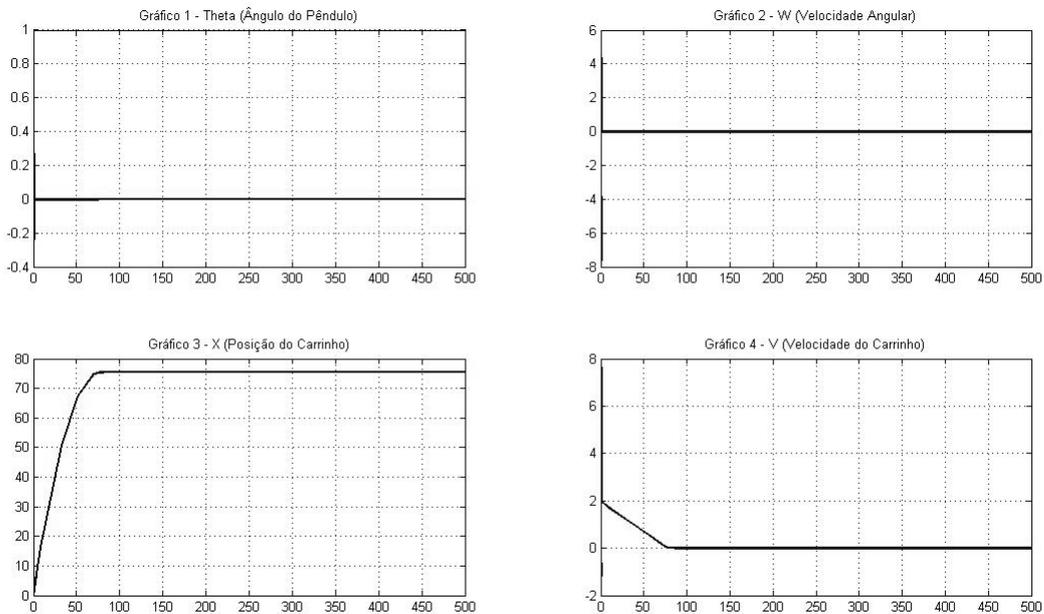
## 4. Resultados

Foram realizados experimentos com variação do ângulo inicial do pêndulo e o controlador nebuloso conseguiu estabilizar o pêndulo no ângulo zero para todos os valores testados no intervalo de  $-PI$  a  $PI$ . Os resultados obtidos pelo controlador nebuloso foram semelhantes àqueles obtidos pelo controlador PID, mas aquele teve a vantagem de controlar também a velocidade do carrinho, fazendo que ficasse parado depois de equilibrado.

As Figuras a seguir mostram os gráficos que comparam os resultados conseguidos pelos dois controladores utilizando apenas o ângulo inicial igual a  $PI/4$ . Foi feita também uma variação do tempo final, usando o tempo final = 1 para comparação das curvas obtidas no início do processo e o tempo final = 500 para comparação da estabilidade do resultado obtido.

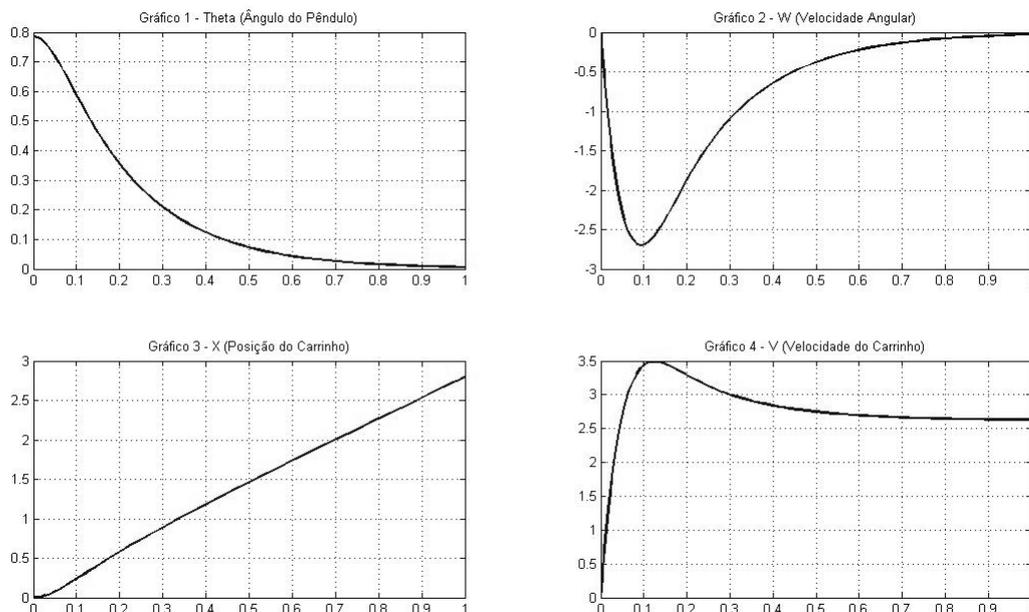


**Figura 2: Gráficos do controlador PID para ângulo inicial =  $\pi/4$  e tempo final = 500**

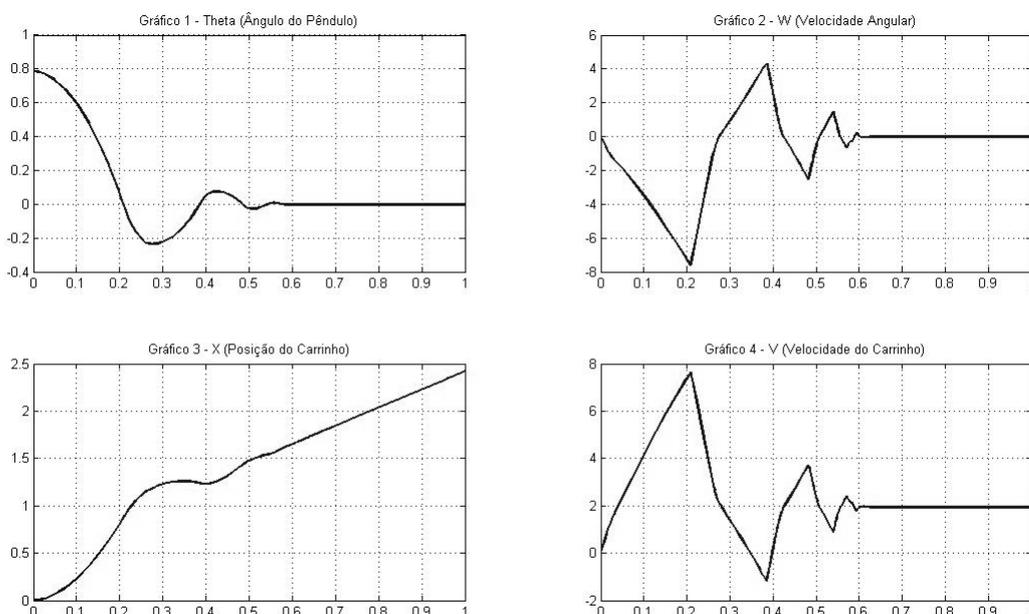


**Figura 3: Gráficos do controlador Nebuloso para ângulo inicial =  $\pi/4$  e tempo final = 500**

Pode-se verificar comparando a Figura 2 com a Figura 3 que ambas mostram o ângulo e a velocidade angular em zero. No entanto, enquanto, para o controlador PID a posição e a velocidade do carrinho sempre aumentam, para o controlador nebuloso depois de decorrido algum tempo a velocidade do carrinho é estabilizada em zero e a posição do carrinho também é estabilizada próxima de 80.



**Figura 4: Gráficos do controlador PID para ângulo inicial =  $\pi/4$  e tempo final = 1**



**Figura 5: Gráficos do controlador Nebuloso para ângulo inicial =  $\pi/4$  e tempo final = 1**

Comparando a Figura 4 com a Figura 5 pode-se ver que ambos os controladores conseguem estabilizar o pêndulo no ângulo zero antes do tempo = 1. Existe, no entanto, uma diferença como esse resultado é obtido. O controlador PID não deixa o pêndulo passar do ângulo zero, enquanto o controlador Nebuloso ultrapassa esse limite por quatro vezes. Essa diferença faz com que a distancia percorrida pelo carrinho e a velocidade final obtida sejam menores no controlador nebuloso.

## 5. Conclusões

Considerando o problema do pêndulo invertido como parte do problema que deve ser resolvido para controle de atitude de um satélite, se pode afirmar que o experimento feito confirmou que o controlador nebuloso pode ser usado com vantagens sobre um controlador PID, conforme outros experimentos já tinham demonstrado.

No experimento o carrinho percorre uma distância menor, usando o controlador Nebuloso do que usando o controlador PID. Quanto à velocidade alcançada para estabilizar o ângulo em zero, o controlador Nebuloso consegue uma velocidade menor que o controlador PID. Considerando a velocidade final do carrinho, o controlador Nebuloso traz uma nova contribuição em relação aos outros controladores Nebulosos de Pendulo Invertido que foram pesquisados, pois conseguiu diminuir a velocidade do carrinho até zero.

Assim, pode-se verificar que a estratégia de controle Nebuloso tem muita facilidade para lidar com sistemas que apresentam comportamento não linear. Os artigos estudados indicam que os sistemas de controle de satélites cada vez mais caminharão na direção da não linearidade, tornando-se cada vez mais complexos e com grau de incerteza cada vez maior, o que dificulta a utilização dos sistemas tradicionais e abre uma extensa gama de aplicações de sistemas baseados em lógica Nebulosa.

## Referências

- CHENG, C.-H.; SHU, S.-L.; CHENG, P.-J. Attitude control of a satellite using fuzzy controllers. **Expert Systems with Applications**, Tarrytown, v. 36, n. 3, p. 6613-6620, 2009.
- GUAN, P.; ZHANG, W.; LIU, X. **The Adaptative Fuzzy Control Based on Backstepping for Satellite Attitude Control**. World Congress on Intelligent Control and Automation. Taipei: [s.n.]. 2011. p. 152-157.
- KUCINSKIS, F. N. **Inferência de Estados e Planejamento no Segmento Espacial para a Operação de Missões Baseadas em Objetivos**. Tese de Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2012.
- NARAYANA, E. V.; BONU, V. S.; RAO, G. M. **PID Versus Fuzzy Logic Based Intelligent Controller Design for a Non Linear Satellite's Attitude Control: Performance Analysis using MATLAB/Simulink**. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGIES (IJAEST). [s.n.]. 2011. p. 190-195.
- RESENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações**. Barueri: Manole, 2003.
- SIMÕES, G. M.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem Fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2007.
- TSOUKALAS, L. H.; UHRIG, R. E. **Fuzzy and Neural Approaches in Engineering**. New York: Wiley-Interscience, 1997.
- ZOTES, F. A.; PEÑAS, M. S. **Intelligent Satellites Control based on Fuzzy Logic in the Earth-Moon Libration Points**. [s.n.]. 2010. p. 605-610.