

# CONTROLE DE CARGA EM SISTEMA MECÂNICO UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

FELIPE CARLOS CRUZ\*, JEREMIAS BARBOSA MACHADO\*

\**Instituto de Engenharias de Sistemas e Tecnologias da Informação, Universidade Federal de Itajubá, Caixa Postal 50, 37500-903 Itajubá, MG, Brasil*

Emails: felipecarcruz@gmail.com, jeremias@unifei.edu.br

**Abstract**— With the advance of technology, with a more demanding market and the establishment of higher quality standards, the product validation through practical testing have been presented as a process of great importance. Through this one we can check if the required specifications of the product are attained. This work aims to present the development control system based on fuzzy logic used in the automation of the process used to validate the flexible command clutch. For this, we developed a fuzzy control system in order to perform the pre-charge control in the clutch command flexible.

**Keywords**— Fuzzy Control, Methods in control, Mamdani Model, Nonlinear Control.

**Resumo**— Com o avanço da tecnologia, com um mercado mais exigente e com o estabelecimento de normas de qualidade cada vez rígidas, a validação de produtos através testes práticos se mostra um processo de grande importância, pois através deste pode-se verificar se as especificações exigidas do produto são atendidas. Neste trabalho pretende-se apresentar o desenvolvimento um sistema de controle baseado em lógica *fuzzy* utilizado na automatização de o processo para a validação do comando flexível de embreagem. Para isso, implementa-se um sistema de controle *fuzzy* a fim de realizar o controle de pré-carga no comando flexível de embreagem.

**Palavras-chave**— Controle *Fuzzy*, Métodos em controle, Modelo de Mamdani, Controle não linear.

## 1 Introdução

Atualmente a maioria das empresas de manufatura trabalha com o intuito de reduzir cada vez mais os custos dos produtos, utilizando, por exemplo, materiais alternativos na confecção dos produtos. Dessa forma, é de extrema importância assegurar as especificações atribuídas, sendo a validação de produto o meio, pelo qual, se faz a verificação.

Neste trabalho pretende-se apresentar o processo de automação de um sistema mecânico de testes capaz de realizar as provas de validação necessárias para a verificação da qualidade de sistemas de comando flexível de embreagem veicular. Visando atender as especificações de qualidade, desenvolveu-se um controlador empregado no sistema de carga a ser aplicada nos testes do comando flexível de embreagem, sendo este controle, um dos requisitos para execução do teste prático de validação, uma vez que é necessário garantir a carga sobre o comando flexível de acordo com as especificações de ensaio presentes na norma específica.

O controlador empregado no sistema de teste se baseia na teoria de conjuntos nebulosos ou conjuntos *Fuzzy*. O conceito de conjuntos *fuzzy* foi concebido por Zadeh (1965) e apresentado não como uma metodologia de controle, mas como uma forma de processamento de dados. Esta abordagem não foi aplicada para controlar os sistemas até a década de 70, devido à capacidade de processamento insuficiente dos computadores da época. Segundo Zadeh as pessoas não necessitavam de precisão, por exemplo, a entrada de dados numéricos, e ainda assim elas apresentam um controle altamente adaptável. Se os controladores de realimentação pudessem ser programados para aceitar como entrada do sistema informações ruidosas, imprecisas. Talvez fosse muito mais eficaz e mais fácil a

implementação (Alavala, 2008).

Basicamente, a lógica *fuzzy* é uma lógica de valores múltiplos que permite que valores intermédios sejam definidos entre as avaliações convencionais, como por exemplo: verdadeiro ou falso, sim ou não, alto ou baixo e entre outros.

Uma das áreas de aplicação mais significativa da Lógica *Fuzzy* tem sido no campo de controle, que teve seu início pelos trabalhos de (Assilian and Mamdani, 1974) na década de 70. Controle *Fuzzy* vem sendo amplamente aplicado ao controle de ventiladores, motores de aeronaves complexas, controle de helicóptero, orientação de mísseis, transmissão automática, controle de deslizamento da roda e processos industriais. Sistemas de controle *fuzzy* apresentam, em geral, melhor desempenho, quando comparado a um controlador PID convencional, principalmente se aplicado ao controle de sistemas não lineares (Lee, 1990).

Para a implementação do controlador proposto utiliza-se a ferramenta computacional LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) da National Instruments. O LabVIEW é um ambiente de programação gráfica que tem como principais campos de aplicação a realização de medições e automação. A lógica da programação é realizada de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a este ambiente vantagens para a aquisição e manipulação de dados.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: na Seção 2 é apresentada a fundamentação teórica das metodologias empregadas. Na Seção 3 é apresentada a descrição do dispositivo de testes. Na Seção 4 encontra-se a estratégia de controle proposta e na Seção 5 os resultados obtidos e finalmente a Seção 6 apresenta as conclusões.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Sistemas Fuzzy

Os sistemas *fuzzy* ou nebulosos são baseados em inferências de regras do tipo “se...então...”, no qual a teoria de conjuntos *fuzzy* e a lógica *fuzzy* fornecem o suporte matemático necessário para tratar processos complexos, baseados em informações imprecisas, incertas e qualitativas (Zadeh, 1965). As etapas que compõem os sistemas de inferência *Fuzzy*, são (Pedrycz and Gomide, 1998):

- Fuzzificação;
- Inferência da base de regras;
- Defuzzificação.

A fuzzificação é o mapeamento das variáveis de entrada, a fim de designar ou calcular um valor para representar um grau de pertinência a elas, a um ou mais grupos qualitativos, chamado de conjuntos difusos. Tais conjuntos são representados por termos linguísticos como: pouco, muito, baixo, alto e entre outros.

O processo de inferência da base de regras é responsável por, a partir dos valores de entrada fuzzificados, inferir o valor de saída correspondente.

A defuzzificação tem a função de atribuir um valor numérico ao conjunto *fuzzy* de saída, o qual é obtido do procedimento de inferência *fuzzy*.

A Figura 1 apresenta o diagrama de fluxo que ilustra o princípio de funcionamento de sistema *fuzzy*:

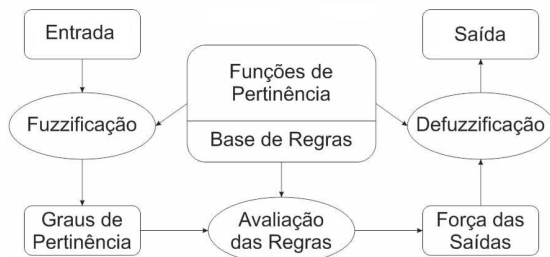


Figura 1: Controlador *Fuzzy*.

### 2.2 Modelo Mamdani

Os modelos *Fuzzy* do tipo Mamdani utilizam conjuntos difusos tanto nos antecedentes da regra quanto nos seus consequentes. Desta maneira a base de regras para um sistema *Fuzzy* do tipo Mamdani pode ser definida exclusivamente de forma linguística, sem a necessidade de dados numéricos de entrada e saída (Assilian and Mamdani, 1974).

Sendo assim, um modelo do tipo Mamdani para um sistema SISO (Single Input Single Output) consiste de um conjunto de regras, como por exemplo (Babuska, 1998):

- R1: Se  $x$  é A1 então  $y$  é B1;

- R2: Se  $x$  é A2 então  $y$  é B2;

- R3: Se  $x$  é A3 então  $y$  é B1;

onde,  $x$  é a variável de entrada e  $y$  a variável de saída do modelo, enquanto que A1, A2 e A3 são os conjuntos nebulosos de entrada e B1, B2 são os conjuntos nebulosos de saída pertencentes às regras Ri, com  $i = 1, 2, 3$ , que definem o modelo *fuzzy* de Mamdani.

Com relação à “defuzzificação”, o processo mais utilizado na literatura para os modelos de Mamdani são os métodos de centro de gravidade e a abordagem de centro dos máximos (Lee, 1990; Dubois and Prade, 1984; Gupta et al., 1985).

## 3 Descrição do Dispositivo de Testes

O processo de testes que se pretende automatizar consiste de um dispositivo para fixar os cabos utilizados em automóveis de acordo com o layout do veículo, dispositivos mecânicos necessários para a realização dos testes, hardwares eletrônicos para aquisição e controle, e um computador com o software LabVIEW para realizar toda a parte de programação, aquisição e análise dos dados. Na Figura 2 é apresentada uma vista em corte da região de fixação dos cabos no dispositivo de testes.

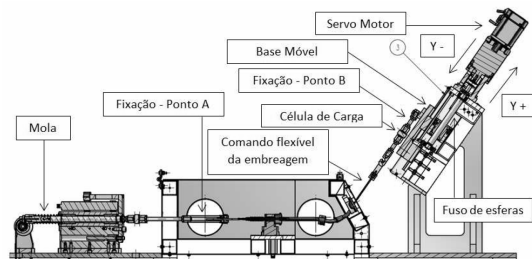


Figura 2: Vista em corte da região de fixação dos cabos.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas duas imagens do dispositivo físico.

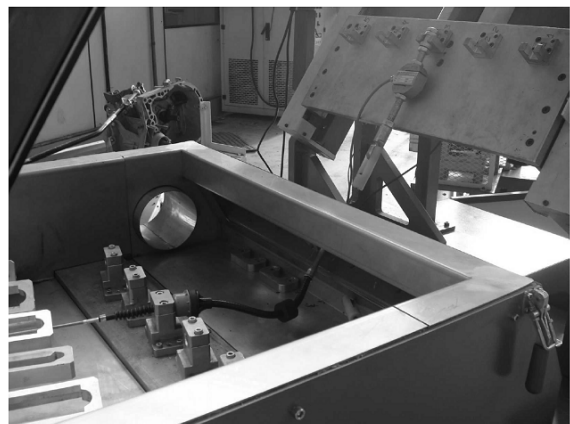


Figura 3: Bancada de Validação/Fixação.

Com a fixação do comando flexível nas extremidades A e B (Fig. 2), o esforço de tração sobre o cabo é executado por um servo motor acoplado a um atuador



Figura 4: Vista frontal da bancada de Validação/Fixação.

do tipo fusão de esferas, o qual, a partir do giro do servo motor movimentada a base móvel causando uma tração no cabo. Portanto, dependendo do sentido de giro do servo motor tem-se um deslocamento da base móvel tanto no sentido “Y+” quanto “Y-”, o que provocará um aumento e uma diminuição de tensão no cabo, respectivamente. O valor de tensão sobre o cabo é obtido através de uma célula de carga. Assim, o sistema de controle de tração do cabo flexível (atuando-se sobre velocidade do servo realizado pelo driver) tem seu diagrama em blocos em malha aberta expressa conforme aparece na Figura 5:

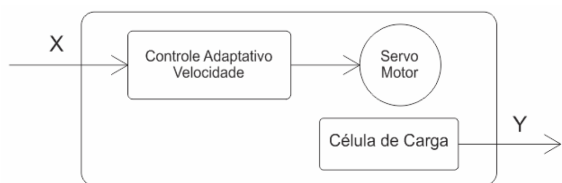


Figura 5: Diagrama de blocos do sistema em malha aberta.

onde,

- X - Referência de velocidade enviada ao driver do servo;
- Y - Leitura da célula de carga em Newton.

A fim de avaliar a resposta do sistema em malha aberta realizou-se um ensaio com entrada do tipo entrada degrau, ou seja, aplicou-se um degrau de velocidade no servo motor e observou-se a resposta de carga do sistema. Desse modo, obteve-se a resposta apresentada na Figura 6.

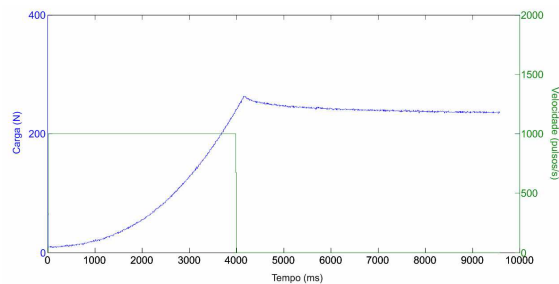


Figura 6: Resposta do sistema em malha aberta.

Nota: A cada 4000 pulsos enviados ao comando do servo motor equivalem a um deslocamento de 10 [mm] na base móvel.

Observa-se que o sistema possui uma resposta não linear devido às propriedades mecânicas do comando flexível e todo sistema de fixação envolvendo mola e coxim.

O processo de controle de carga era realizado de forma manual, havendo sempre a necessidade da presença de um operador dedicado para tal procedimento tendo como finalidade manter a carga constante sobre o cabo. Devido à demanda por um processo automatizado de testes e às características não lineares da planta, optou-se pela utilização de um sistema de controle *fuzzy*.

#### 4 Estratégia de Controle Proposta

A escolha da de um sistema de controle *fuzzy* se justifica devido à robustez deste tipo de controlador e um bom desempenho no controle de sistemas não lineares. Além disso, a utilização do referido controlador no processo descrito anteriormente se mostra vantajosa já que não necessita de um modelo matemático do processo, o que é vantajoso de ser aplicado em uma bancada de testes onde se pode testar vários elementos diferentes com distintas características dinâmicas. O diagrama de blocos do sistema de teste, em malha fechada, é apresentado na Figura 7:

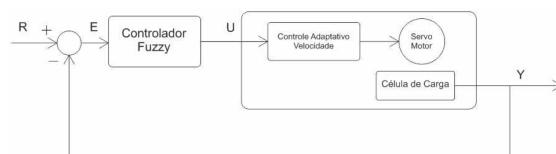


Figura 7: Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.

onde:

- R - Referência de carga;
- U - Ação de controle enviada ao driver do servo;
- Y - Valor da Carga fornecido pela célula de carga em Newton;
- E - Valor do erro.

No modelo *fuzzy* proposto, utilizaram-se os seguintes parâmetros:

- Variáveis de entrada:
  - i. Erro;
  - ii. Variação do erro (d(Erro)/dt);
- Variáveis de saída:
  - i. Valor de Velocidade;

Portanto, as regras terão como variáveis *fuzzy* nos antecedentes: Erro e d(Erro)/dt; e como variável *fuzzy* nos consequentes o valor do comando para o controle de velocidade.

Para a elaboração do conjunto de regras, analisou-se, primeiramente, a resposta desejada para o sistema, tendo como objetivo sempre a minimização do erro para a mudança de referência da malha, sendo a resposta desejada apresentada na Figura 8.

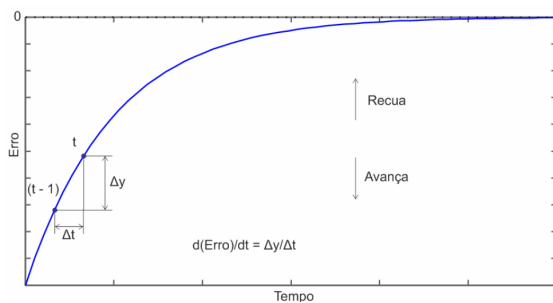


Figura 8: Resposta desejada para o sistema.

No gráfico da resposta desejada para o sistema apresentado na Figura 8 tem-se que:

- $d(Erro)/dt = [(Erro \text{ no instante } t) - (Erro \text{ no instante } t - 1)]/\Delta t$ ;
- Avança - Indica o sentido da base móvel e neste caso um incremento negativo no Erro;
- Recua - Indica o sentido da base móvel e neste caso um incremento positivo no Erro.

A partir da análise da resposta e associando valores numéricos com variáveis linguísticas criadas para o sistema de controle *fuzzy* pode-se definir as regras que compõem o controlador *fuzzy* conforme apresentado na Tabela 1.

As variáveis linguísticas do sistema *fuzzy* são definidas como:

- P - Positivo;
- Z - Zero;
- N - Negativo;
- AV - Avança;
- RE - Recua;
- PA - Parar;

e variáveis compostas com

- m - Médio;
- p - Pouco;
- pp - Menos que pouco.

Tabela 1: Base de regras.

		d(Erro)/dt		
		P	Z	N
Erro	P	AV	AV	AV
	pP	AV	mAV	mAV
	ppP	pAV	pAV	ppAV
	Z	ppAV	PA	ppRE
	ppN	ppRE	pRE	pRE
	pN	mRE	mRE	RE
	N	RE	RE	RE

Para as siglas compostas, por exemplo, “pP”, tem-se que a variável linguística é dada por Pouco Positivo.

Os conjuntos *fuzzy* relacionados às variáveis linguísticas foram inicialmente definidos a partir das análises feitas do sistema em malha aberta, e posteriormente com a realização de alguns ensaios práticos e fazendo os ajustes necessários, chegou-se na parametrização das funções de pertinência presentes nos antecedentes e consequentes das regras do modelo (apresentadas nas Figuras 9, 10 e 11).

- Erro - Faixa (-50N, 50N)

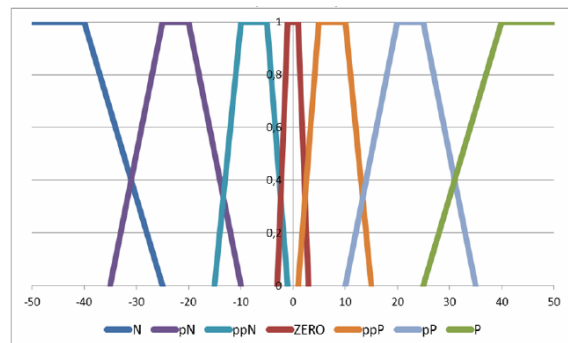


Figura 9: Conjuntos *Fuzzy* (Erro).

- $d(\text{Erro})/dt$  - Faixa (-30N, 30N)

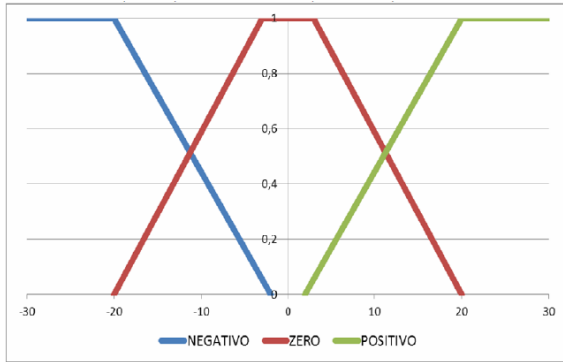


Figura 10: Conjuntos *Fuzzy* ( $d(\text{Erro})/dt$ ).

- Velocidade - Faixa (-1N; 1N)

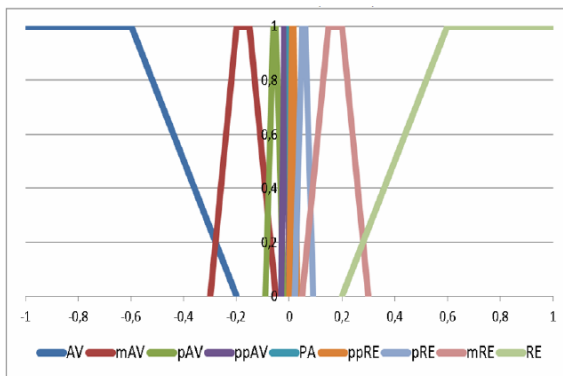


Figura 11: Conjuntos *Fuzzy* (Velocidade).

Fazendo-se as inferências de regras para todas as faixas das variáveis de entrada para obter a saída e considerando o método de “defuzzificação” por centro de área, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 12 como o valor da ação de controle em função das variáveis nos antecedentes das regras.

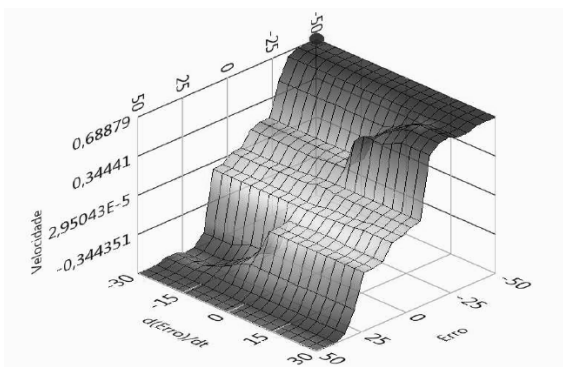


Figura 12: Superfície de inferência dos conjuntos *fuzzy*.

## 5 Resultados

Uma vez estabelecidas as regras que iriam compor o controlador *fuzzy* proposto para o controle de

carga sobre o comando flexível na bancada de testes implementou-se o controlador *fuzzy* em um sistema computacional dedicado ao processo de automatização da bancada de testes e validação. Esta implementação foi realizada no software LabVIEW devido as suas funcionalidades próprias para sistemas de controle, aquisição de dados e supervisão.

A partir dos testes realizados obteve-se as seguintes respostas para a saída do sistema de controle com as respectivas ações de controle para dois diferentes testes de carga, o primeiro com uma carga de 30 N (Figuras 13, 14) e o segundo com uma carga de 70 N (15 e 16).

- Referência 30N

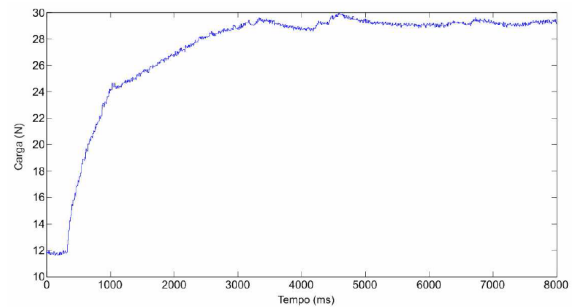


Figura 13: Carga(N) x Tempo (ms) - Ref. 30N.

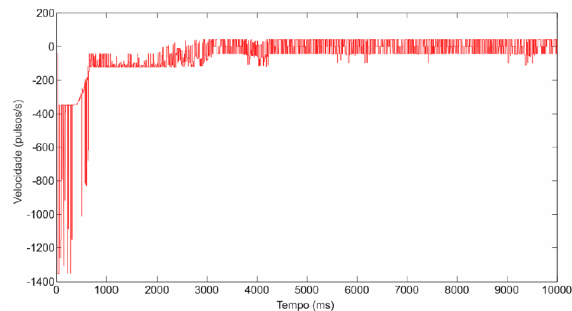


Figura 14: Sinal de Controle/ Velocidade(pulsos/s) x Tempo(ms) - Ref. 30N.

- Referência 70N

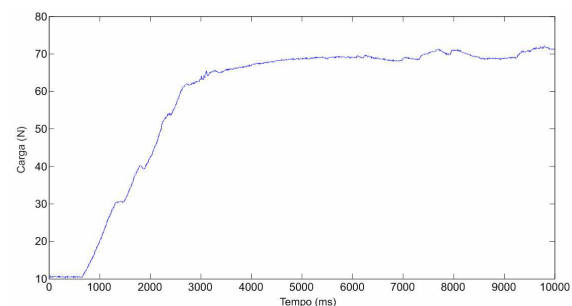


Figura 15: Carga(N) x Tempo (ms) - Ref. 70N.

Analisando-se os resultados pode-se verificar que em ambos ensaios foram obtidos resultados satisfatórios atingindo-se as expectativas para a resposta do sistema em várias amplitudes de carga estabelecidas.

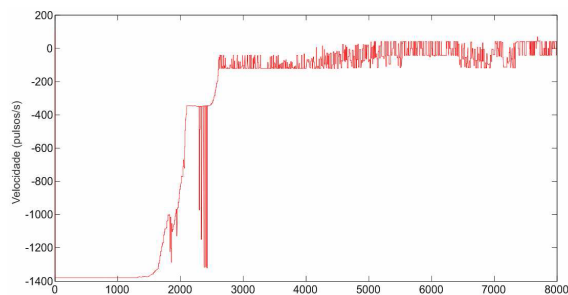


Figura 16: Sinal de Controle/ Velocidade(pulsos/s) x Tempo(ms) - Ref. 70N.

Tendo em vista que o processo de carga é não linear, o comportamento apresentado pelo sistema em malha fechada apresentou excelente desempenho tornando válida a utilização de um controlador *fuzzy* nesta aplicação. Outra vantagem verificada é que independentemente do comando flexível a ser testado, dado que cada um deles apresenta características dinâmicas diferentes, não houve necessidade de ajustes no sistema de controle o que tornava o processo de testes mais rápido e eficiente.

## 6 Conclusão

Neste trabalho propôs-se a utilização de um controlador *fuzzy* para o controle de carga em um sistema de testes de comando flexível de embreagem. A utilização deste sistema de controle possibilitou a automação do processo de testes e validação e assim um incremento na qualidade e na economia de tempo e demais recursos como hora/máquina e mão de obra, já que anteriormente era necessária a utilização de um operador para a execução dos testes. Os resultados obtidos com a utilização do controlador proposto apresentaram-se satisfatórios, com um valor de carga constante sobre os cabos flexíveis testados em diferentes amplitudes de carga, justificando, desta maneira, a utilização de tal sistema de controle.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da UNIFEI para o desenvolvimento e apresentação deste trabalho.

## Referências

- Alavala, C. R. (2008). *Fuzzy Logic and Neural Networks*, Ed. New Age International Publishers.
- Assilian, S. and Mamdani, E. H. (1974). *Artificial Intelligence in Control of Real Dynamic Systems*, Dep. Elec. Eng. Queen Mary College, Londres.
- Babuska, R. (1998). *Fuzzy Modeling for Control*, Kluwer.

Dubois, D. and Prade, H. (1984). Fuzzy logics and the generalized modus ponens revisited, *Cybernetics and Systems* **15**(3-4): 90–106.

Gupta, M. M., Kandel, A., Bandler, W. and Kiszka, J. B. (1985). *The generalized modus ponens under supmin composition - A theoretical study*, Eds. Amsterdam, North Holland.

Lee, C. C. (1990). Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller - parts 1 and 2, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics* **20**(2): 404–435.

Pedrycz, W. and Gomide, F. A. C. (1998). *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design (Complex Adaptive Systems)*, MIT Press.

Zadeh, L. (1965). Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller - parts 1 and 2, *Fuzzy Sets. Information and Control* **8**: 338–353.