



08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PID E FUZZY APLICADAS AO CONTROLE DE VELOCIDADE DE MÁQUINAS DE INDUÇÃO TRIFÁSICAS

**Rodolfo Robeiro Oliveira Neto\*** - rodolfo.neto@iff.edu.br

**Mayra Mota Medeiros\*** - maymotm@gmail.com

**Suellen Nascimento\*** - suellen.nascimento@iff.edu.br

\*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil

**Resumo.** *As máquinas de indução representam uma parcela significativa em aplicações industriais devido a sua simples operação e baixo custo de instalação. Neste sentido, há uma busca incessante por métodos de controle que permitam aumentar sua eficiência e performance. Este trabalho tem por finalidade comparar duas estratégias de controle aplicáveis no controle de velocidade de máquinas de indução trifásica: controle PID e controle Fuzzy. Ao serem comparados, a lógica Fuzzy, mostrou-se mais eficiente por permitir um controle flexível e dependente dos dezoito entre níveis desejados de velocidade e os medidos. O que demonstra a viabilidade da utilização de controladores Fuzzy para melhorar o desempenho de máquinas de indução.*

**Keywords:** *motor de indução, PID, Fuzzy, controle vetorial*

### 1. INTRODUÇÃO

Os motores elétricos estão presentes em diversos setores e representam uma parte significativa do consumo de energia mundialmente, principalmente nas indústrias. Estratégias de controle são estudadas a fim do alcance de um aperfeiçoamento e aprimoramento no funcionamento dessas máquinas. Busca-se um melhor rendimento, com respostas rápidas e de alta precisão, contribuindo assim, não só para o campo econômico-financeiro, mas o tecnológico. Comparando parâmetros como faixa de controle de torque, velocidade e posição, os motores de corrente contínua apresentam procedimentos mais baratos do que os motores de corrente alternada (CHAPMAN, 2013).

Atualmente, a máquina de indução trifásica (MIT) pode ser indicada como uma boa escolha para acionamentos controlados. A área de pesquisa voltada para acionamentos elétricos vem se desenvolvendo bastante, com um viés para a operação destas máquinas em modo de controle vetorial (VC).

O uso de MIT no modo VC mostra-se como opção mais econômica, potente e livre de manutenção, devido a inexistência de circuito comutador. Com o avanço no processo de eletrônica de potência utilizando softwares mais atuais e processadores de alta velocidade, a abordagem

proposta torna-se viável, porém não tão simples devido à complexidade da estrutura (SUE-TAKE, 2010).

O MATLAB® é um *software* que apresenta uma interface amigável e condições necessárias para a realização dessas simulações. A partir disso, o artigo oferece uma abordagem computacional e apresenta o sistema de modelagem e estudo do motor de indução controlado por vetor, utilizando controladores PID e *Fuzzy*, em diferentes condições de operação, com o intuito de caracterizar as diferenças entre essas estratégias de controle (MATLAB, 1994).

## 2. METODOLOGIA

A proposta desse projeto é desenvolver uma comparação do controle de velocidade do motor de indução trifásico no modo vetorial em malha fechada, utilizando controlador PID e controlador *Fuzzy*. Busca-se, por meio das comparações entre as respostas obtidas através destas estratégias, estabelecer qual proporciona maior eficiência na resposta às variações do comportamento da carga.

### 2.1 Controle da Máquina de Indução

O controle de máquinas de indução é uma tarefa de certa forma desafiadora, uma vez que duas grandes dificuldades estão na necessidade de fornecer tensão de frequência ajustável e a não linearidade e complexidade do modelo analítico do motor. (TRZYNADLOWSKI, 2000).

No entanto, referente ao controle de velocidade, as máquinas de indução trifásicas, através da alimentação feita por inversores de frequência, possuem consumo menor e produzem menos harmônicos, possibilitando que a máquina opere em diversos regimes.

A metodologia utilizada nesse trabalho para o controle de velocidade da máquina de indução trifásica baseia-se em conservar a relação V/Hz constante, que objetiva a manutenção do fluxo de entreferro, confirmando que a máquina opere de forma adequada. Se a tensão de alimentação da máquina for modificada sem que a frequência seja ajustada, a máquina tem a possibilidade de atuar com o campo enfraquecido ou na região de saturação. O primeiro é causado devido a diminuição da tensão de alimentação e elevação da frequência aplicada. Por sua vez, a segunda consequência ocorre devido a elevação da corrente por decorrência do aumento da tensão aplicada e/ou pelo decréscimo da reatância provocado pelo diminuição da frequência. Possuindo esse dados, pode-se projetar o esquema representado pelo diagrama de blocos da Figura 1.

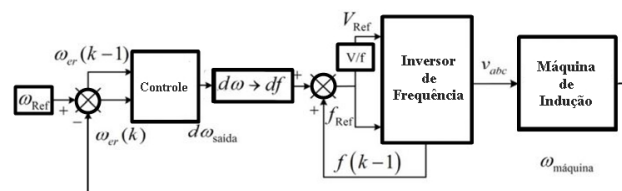


Figura 1- Diagrama Geral de Blocos de Controle do Sistema.

Compara-se o sinal de velocidade com a velocidade escolhida como referência ou *set-point* e gera-se entradas para o bloco do controlador. Tais entradas representam o erro de velocidade

e a sua variação no intervalo de uma amostragem.

O sistema do controlador, a partir disso, gera a ação de controle que consiste no aumento ou diminuição da frequência de referência do inversor. A fim de manter constante o fluxo, a tensão é alterada para produzir uma tensão de alimentação apropriada ao acionamento do motor de indução trifásico.

A modelagem do motor de indução é constituída por equações que apoiam-se na abordagem matricial/vetorial representadas pelo sistema de coordenadas  $dq0$ , simplificando o modelo.

## 2.2 Controle Vetorial

Com o desenvolvimento dos estudos de controle, novos sistemas foram criados com a finalidade de obter controladores mais precisos e que atinjam o valor de referência de forma mais rápida. Entre eles, pode-se citar as técnicas de controle vetorial. O controle vetorial faz-se necessário em aplicações em que são exigidas alta performance dinâmica, respostas rápidas e alta precisão de regulação de velocidade (FRANCHI, 2013).

Através desse controle, é possível trabalhar com torque preciso em uma vasta faixa de operação, sobretudo em baixa rotação em que o motor opera na região de enfraquecimento de campo. O controle vetorial aproxima ainda mais o modo de operação do motor de indução trifásico ao motor de corrente contínua com relação ao controle de velocidade.

Existem dois tipos de controle vetorial: o de malha aberta, também conhecido como *sensorless* e o de malha fechada, que exige o uso de algum tipo de sensor de velocidade (FITZGERALD, 2014).

## 2.3 Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

O controle PID (Proporcional Integral Derivativo) é uma das técnicas mais adequadas quando se deseja efetuar o controle de variáveis contínuas. Este controle trata-se de um algoritmo matemático, que possui a finalidade de realizar o controle preciso de uma variável em um sistema, permitindo ao mesmo operar de forma estável no ponto de ajuste desejado.

A ação proporcional elimina as oscilações da variável, tornando o sistema estável, mas não garante que a mesma esteja no valor desejado. A ação integral, por sua vez, elimina o desvio de *off-set*, fazendo com que a variável permaneça próxima ao valor desejado para o sistema, mesmo após um distúrbio. Em outras palavras, ela mantém-se próxima ao set-point mesmo ocorrendo uma variação ríspida nas condições de operação.

A ação derivativa evita, antecipadamente, que o desvio se torne maior quando o processo é caracterizado por possuir uma correção demorada em comparação com a velocidade do desvio. Portanto, o controle derivativo antecipa o erro atuante e inicia uma opção corretiva mais cedo, proporcionando o aumento da estabilidade do sistema (OGATA, 1998).

## 2.4 Controlador Fuzzy

A lógica *Fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos *Fuzzy* e busca substituir o raciocínio exato a um caso de raciocínio aproximado, sendo caracterizado por regras do tipo *Se-Então* (CARVALHO, 2010).

O controlador, também chamado de nebuloso, é um sistema composto de um conjunto de regras de produção do tipo SE <premissa> ENTÃO <conclusão> que estabelecem ações de controle em função das diferentes faixas de valores que as variáveis de estado do problema podem assumir.

A lógica *Fuzzy* aproxima o parecer computacional do parecer humano, tornando as máquinas mais capacitadas e desenvolvendo os sistemas de controle. A lógica passa a não ser mais booleana, mas definida a partir de decisões abstratas.

Para a realização desse tipo de controle, não é necessária a modelagem do processo, e sim o conhecimento de um especialista na elaboração das funções de pertinências, ou seja, dos parâmetros. O sistema *Fuzzy* representa a modelagem da planta por meio dessas funções, o que faz de sua escolha um processo determinante e minucioso.

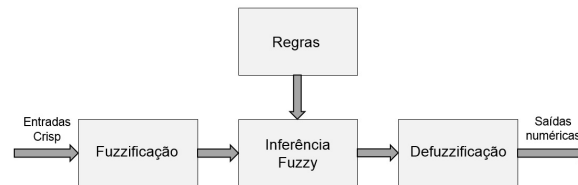


Figura 2- Sistema Fuzzy.

Um controlador *Fuzzy* resume-se nas etapas apresentadas na Figura 2. Ele consiste nas seguintes etapas: um estágio de entrada, onde são definidas as funções de pertinência (fuzzificação), um estágio de processamento, no qual um conjunto de regras é responsável pela tomada de decisão (inferência) e um estágio de saída, onde ocorre a conversão dos resultados das regras nebulosas em saídas numéricas para que seja possível a ação de controle (defuzzificação). O controle *Fuzzy*, portanto, dar-se-á pela ponderação adequada das regras do sistema, produzindo respostas que dependem do comportamento da variável analisada (SIMOES; SHAW, 2007).

### 3. RESULTADOS

De acordo com os conceitos vistos previamente foram concebidas as estratégias de controle da máquina de indução trifásica. O primeiro diagrama de blocos, ilustrado na Figura 3, apresenta o diagrama de blocos do processo que realizará o controle da velocidade do motor.

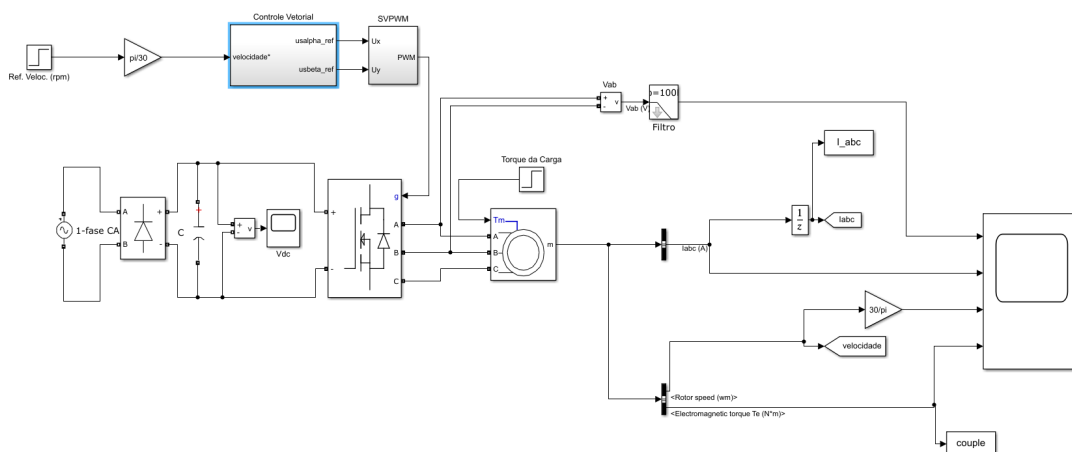


Figura 3- Diagrama de Blocos do Processo.

A figura 4 ilustra o diagrama de blocos do controlador PID implementado. Ele possui 4 grandes módulos: o conversor de eixo  $ABC$  para  $dq0$  (necessário para a implementação do controle clássico), os controles das tensões de referência  $Us_{qc}$  e  $Us_{dc}$  (cujos sinais de *feedback* provêm do conversor  $ABC/dq0$ ) e módulo de conversão  $dq0/\alpha\beta$  (responsável por fornecer o sinal de referência para o bloco PWM ilustrado na figura 3). Todos os ganhos dos compensadores foram ajustados para que a resposta aos estímulos fossem o mais rápido possível, ou seja, baixo sobressinal, curto tempo de acomodação e ganho marginal alto após a compensação, para garantir a estabilidade e robustez do sistema.

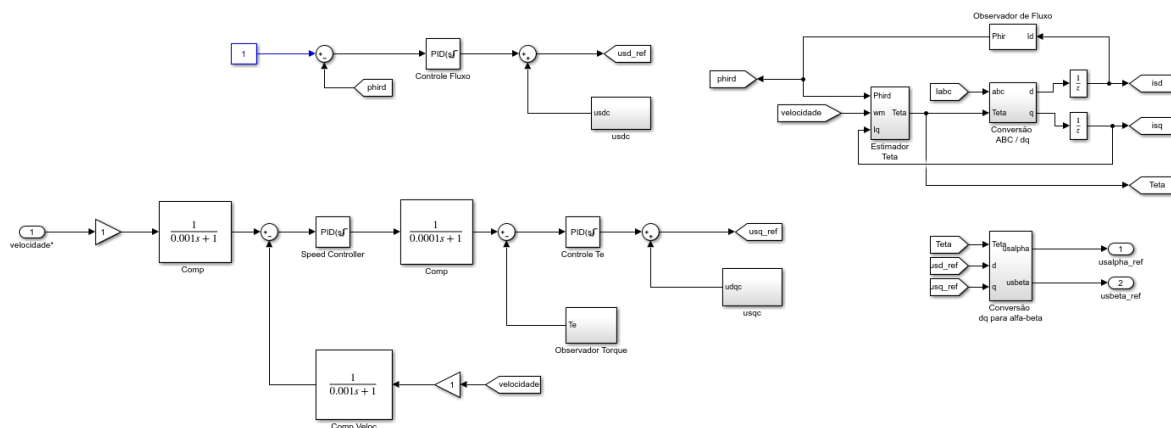


Figura 4- Diagrama de Blocos do Controle Vetorial.

Em seguida, foi projetado o diagrama de blocos referente ao controle da máquina de indução trifásica através da lógica *Fuzzy*. Este diagrama está descrito na Figura 5.

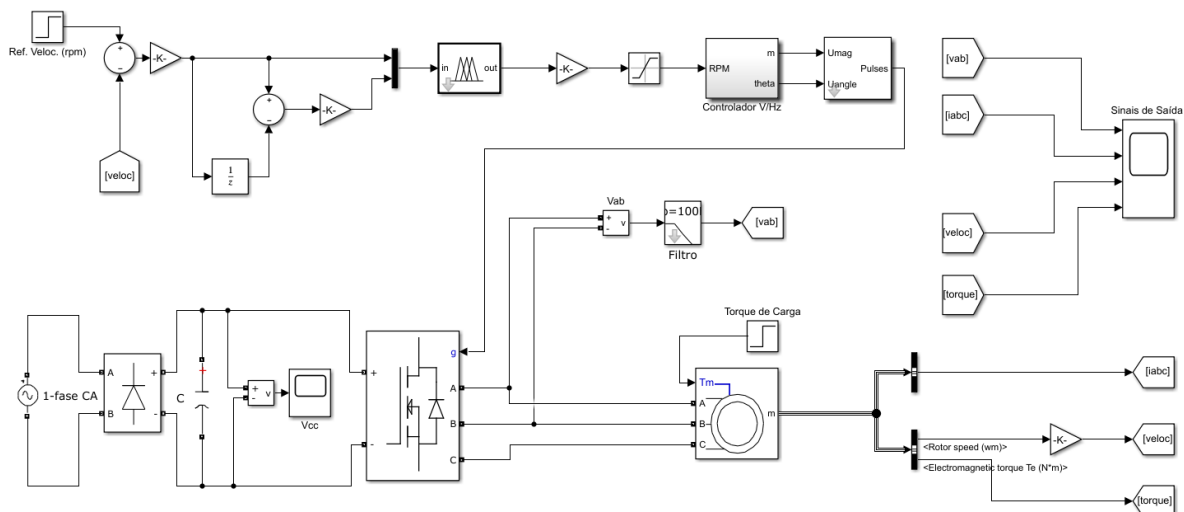


Figura 5- Diagrama de Blocos do Controle *Fuzzy*.

O bloco controlador V/Hz é o mesmo bloco visto na figura 3, com pequenas modificações para se adequar à nova entrada, proveniente do controlador *Fuzzy*. As entradas e saídas do controlador *Fuzzy* estão descritas na figura 6 onde  $Error$ , denominado  $e(k)$ , representa o erro entre

setpoint e valor aferido pelo sensor e  $ChangeInError$ , denominado  $\Delta e$ , representa a derivada discreta do mesmo.

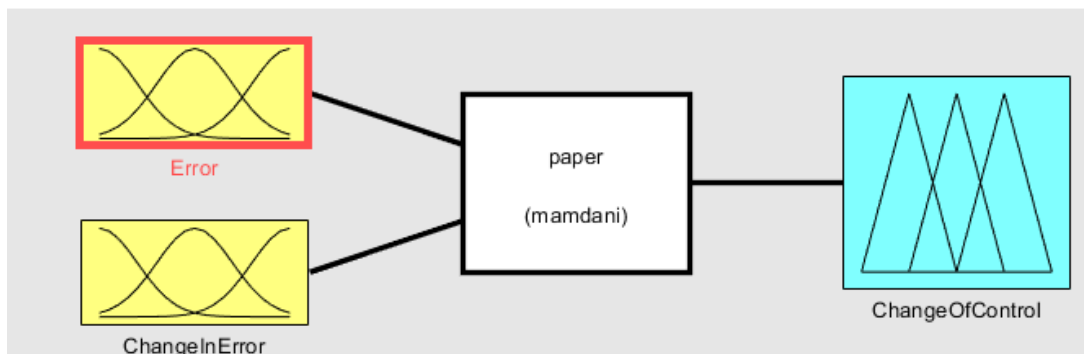


Figura 6- Entradas e Saída do Controle Fuzzy.

O ajuste das funções de pertinência estão apresentados na figura 7.

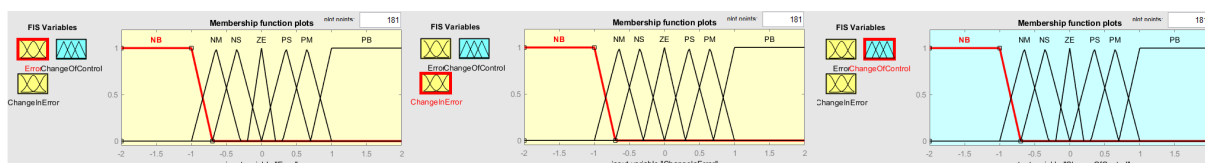


Figura 7- Funções de pertinência do Controle Fuzzy.

As regras para a tomada de decisão do controlador Fuzzy encontram-se ilustradas na figura 8 que apresenta uma tabela em formato de matriz onde a coluna 1 representa os valores de  $e(k)$ , a linha 1 os valores de  $\Delta e$ . e os elementos  $a_{ij}$  representam os valores da saída do controlador para o erro  $e(k) = a_{i1}$  e taxa de variação  $\Delta e = a_{1j}$  se  $i \neq 1$  e  $j \neq 1$ .

	$\Delta e$				
$e(k)$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

Figura 8- Regras do Controle Fuzzy.

Tais regras foram tomadas a partir das variações de  $e(k)$ , o comportamento de  $\Delta e$  e das premissas de como o processo deve se adaptar tendo como base os níveis destes sinais de entrada. Exemplificando, se o erro  $e(k)$  do sistema é grande e positivo (PB, do inglês *positive big*) e a derivada  $\Delta e$  é nula (ZE, zero), então o sistema se acomodou em um nível acima do

desejado. Portanto, é necessário elevar o ganho do sistema para que o controlador PID atue mais agressivamente.

Nota-se que os dois blocos se tratam do controle de um mesmo sistema utilizando dois métodos de controle distintos. Para se comparar essas estratégias de controle, ambos foram designados para o controle de uma máquina de indução trifásica com as características apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Características do Motor de Indução Utilizado *MindWave Mobile Headset*.

Caraterísticas	Valores
Potência no Eixo	37 kW
Tensão Nominal	460 V
Frequência Nominal	60 Hz
Momento de Inércia	1.662 kg.m <sup>2</sup>
Pares de Polo	2
Resistência / Indutância do Estator	0.087 Ω / 0.8 mH
Resistência / Indutância do Rotor	0.228 Ω / 0.8 mH
Mútua Indutância	34.7 mH

Quando submetida a cargas variadas no seu eixo, a máquina apresentou diferentes comportamentos para as estratégias de controle em questão. Para a estratégia PID observaram-se as formas de onda ilustradas na Figura 9.

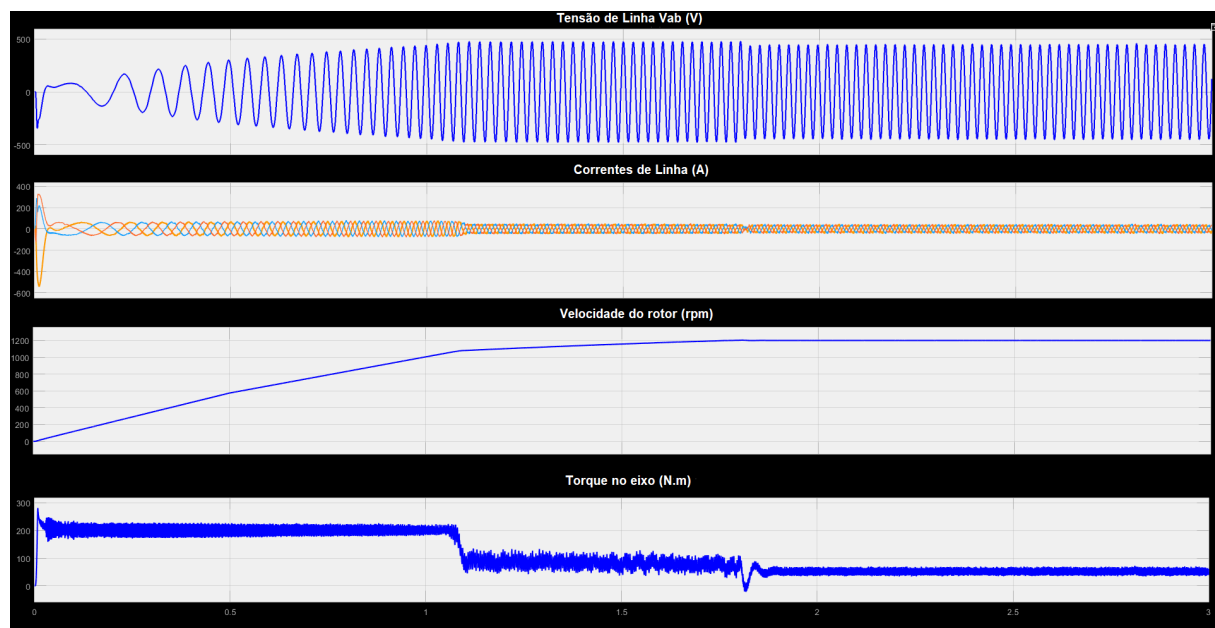


Figura 9- Sinais de saída do sistema após atuação do controlador PID.

Em contrapartida, as formas de onda produzidas pela aplicação do controlador *Fuzzy* estão esboçadas na Figura 10.

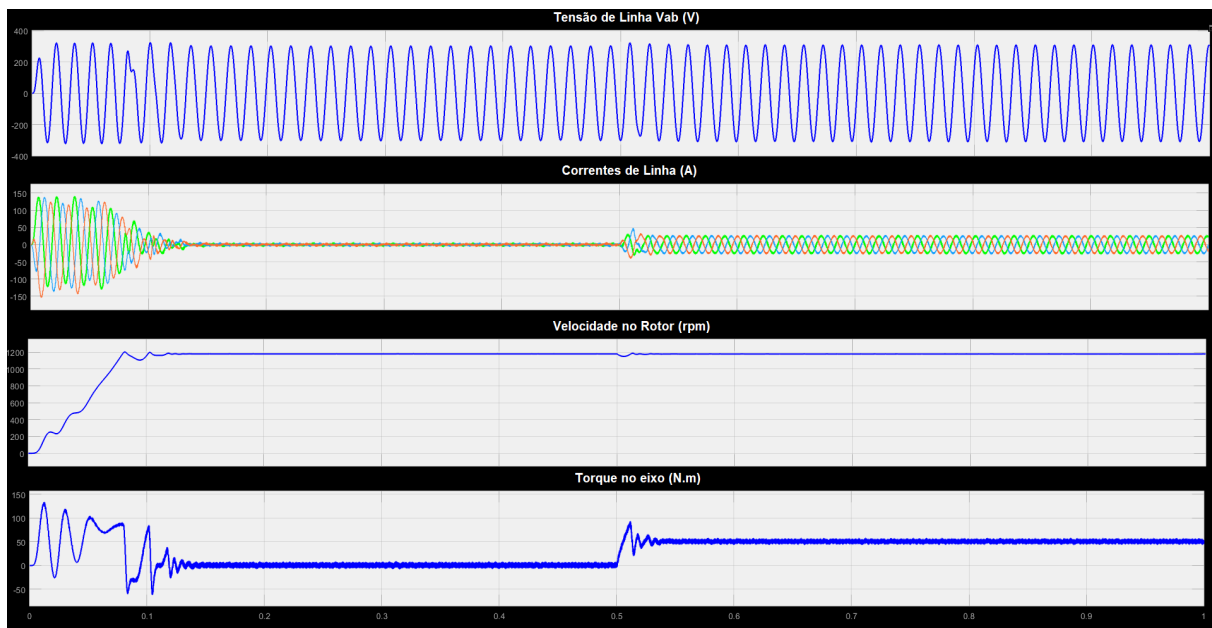


Figura 10- Sinais de saída do sistema após atuação do controlador *Fuzzy*.

Observa-se que em ambos os casos o controle da velocidade de rotação da máquina de indução é alcançado. O controle através da lógica *Fuzzy* apresenta tempo de subida, ou seja, resposta aos estímulos do sistema, mais rápido que a resposta da estratégia PID. No entanto, percebem-se grandes desequilíbrios entre as correntes de linha até que a rotação da máquina esteja próxima ao *set-point* de 1200 rpm, estipulado para ambas as estratégias.

Comparando o controle de ambas as estratégias no período transitório da corrente, pode-se notar que o controle PID mostrou-se menos eficiente que o controle *Fuzzy*. Este fato se dá pela boa escolha das funções de pertinência do controlador *Fuzzy*, tornando-o mais eficaz no processo de controle quando os valores medidos de velocidade da máquina se destoam do *set-point*. Pode-se observar, também, que o aumento brusco de velocidade acontece em detrimento de variações bruscas no torque desenvolvido pela mesma no transitório.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi demonstrada a aplicação de duas estratégias de controle para a restrição da velocidade de rotação de uma máquina de indução, onde ambas são baseadas em um controle denominado V/Hz constante.

Analisando as formas de onda obtidas, foi possível constatar que o controle por lógica *Fuzzy* mostrou-se mais estável por alcançar os níveis de velocidade estipulados em menor tempo, trabalhando o controle desde o regime transitório até os valores desejados de velocidade.

Para trabalhos futuros, espera-se realizar ensaios práticos para a constatação da eficácia do controlador *Fuzzy*, bem como, explorar novas técnicas de controle a fim de melhorar a performance da máquina e otimizar o consumo de energia.



## REFERÊNCIAS

- CARVALHO, A. S. et al. Modelo Autorregressivo E Controlador Fuzzy Para Um Sistema De Controle Digital De Velocidade Do Kit Digital Servo. *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*, 2010.
- CHAPMAN, S. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Bookman, 2013.
- FITZGERALD, A. E. *Electric Machinery*. [S.l.]: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2014.
- FRANCHI, C. M. *Inversões de Frequência: Teoria e Aplicações*. São Paulo: Érica, 2013. 77 p.
- MATLAB. *Reference Guide*. [S.l.]: The Math Works Inc, 1994.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 3<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1998. 188 p.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e Modelagem Fuzzy*. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Edgard Blucher, 2007.
- SUETAKE M.; SILVA, I. G. A. Sistema Fuzzy Compacto Embarcado Em DSP E Sua Aplicação Para Controle V/f De Motores De Indução. *Sba: Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 21, p. 245–259, 2010.
- TRZYNADLOWSKI, A. M. *Control of Induction Motors*. [S.l.]: Academic Press, 2000.

## COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN PID AND FUZZY CONTROL STRATEGIES APPLIED TO THE SPEED CONTROL OF THREE-PHASE INDUCTION MACHINES

### **Abstract.**

*Induction machines represent a significant part of industrial applications due to their simple operation and low installation cost. Hence, there is an incessant search for control methods that increase its efficiency and performance. This paper aims at comparing two control strategies applicable to the speed control of three-phase induction machines: PID control and Fuzzy control. When compared, the Fuzzy logic proved to be more efficient by allowing flexible and rate-dependent control between desired and measured velocity levels. This demonstrates the feasibility of using Fuzzy controllers to improve the performance of induction machines.*

**Keywords:** *induction motor, PID, Fuzzy, vector control.*