

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o
texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir de
05/12/2021.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

TIAGO VERONESE ORTUNHO

**PROJETO DE CONTROLADORES CHAVEADOS PARA ACIONAMENTO DE UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Ilha Solteira
2020

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TIAGO VERONESE ORTUNHO

**PROJETO DE CONTROLADORES CHAVEADOS PARA ACIONAMENTO DE UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos
para obtenção do título de Doutor em Engenharia
Elétrica.

Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
Orientador

Ilha Solteira
2020

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

O78p Ortunho, Tiago Veronese.
Projeto de controladores chaveados para acionamento de um motor de indução trifásico / Tiago Veronese Ortunho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020
141 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2020

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
Inclui bibliografia

1. Controle robusto chaveado. 2. Desigualdades matriciais lineares. 3. Fuzzy Takagi-Sugeno. 4. Motor de indução trifásico.

Raiane da Silva Santos
Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Biblioteca, Arquivo e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB 3 - 9593

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Projeto de Controladores Chaveados para Acionamento de um Motor de Indução Trifásico.

AUTOR: TIAGO VERONESE ORTUNHO

ORIENTADOR: MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:

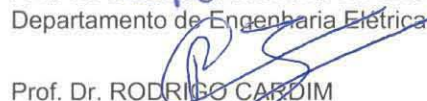


Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. JEAN MARCOS DE SOUZA RIBEIRO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. RODRIGO CARDIM

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. ALESSANDRO GOEDEL

Campus Cornélio Procopio / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR


Prof. Dr. CRISTIANO QUEVEDO ANDREA

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia - FAENG / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

Ilha Solteira, 05 de junho de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me abriu as portas e me mostrou os caminhos a serem seguidos nas horas difíceis, me dando sabedoria e paciência para enfrentar as barreiras.

Em seguida agradeço meus pais, Roberto e Jandira, que investiram em mim desde criança, deixando seus sonhos para trás para apostarem nos meus. Pela educação que me deram, pela confiança, ensinamentos e por sempre estarem ao meu lado, me ajudando e me confortando.

Também tenho que agradecer minha querida irmã, Vanessa, que sempre me ajuda e apoia em todos os momentos, minha grande amiga, com quem sei que sempre posso contar.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira, pela oportunidade em desenvolver este trabalho e por enriquecer meus conhecimentos com sua vasta sabedoria.

Ao Professor Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro meu agradecimento pelos ensinamentos e apoio.

Aos professores do Laboratório de Controle que direta ou indiretamente auxiliaram no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas de laboratório pelo auxílio no decorrer do trabalho.

Ao IFSP – Câmpus Presidente Epitácio pelo apoio e auxílio, em especial aos colegas da área da Indústria pelas valiosas contribuições.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Ilha Solteira e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 pelo apoio.

RESUMO

A tese apresenta a análise de uma técnica de controle para o acionamento de um motor de indução trifásico (MIT) com rotor gaiola de esquilo utilizando controladores robustos chaveados cuja regra de comutação considera a minimização da derivada da função de Lyapunov do tipo quadrática. Os controladores são projetados através de ferramentas matemáticas, denominadas de Desigualdade Matriciais Lineares (LMIs), em inglês, *Linear Matrix Inequalities*, considerando incertezas paramétricas e/ou falhas na planta. Através das equações dinâmicas com controle vetorial e orientação pelo fluxo do rotor foi representado o modelo em variáveis de estado e utilizado o *software* Matlab/Simulink, com os *solvers* de resolução matemática, Yalmip e Sedumi. Analisou-se o comportamento dos controladores robustos chaveados comparativamente aos controladores robustos evidenciando-se a superioridade dos controladores chaveados através das respostas dinâmicas do MIT. Na sequência foi desenvolvido o projeto de controladores chaveados para o acionamento do MIT com incertezas paramétricas e/ou falhas considerando uma região de operação (região na qual garante-se que as trajetórias do vetor de estado permaneçam em seu interior), sendo este um diferencial do trabalho, por não possuir na literatura pesquisas com este conceito aplicado no acionamento do MIT. Além disto, foi considerada a existência da saturação na entrada de controle, com o objetivo de explorar a possibilidade de contribuição do controle chaveado frente a limitação na entrada de controle. Por fim, efetuou-se a modelagem fuzzy Takagi-Sugeno (TS) do motor de indução trifásico, definindo os modelos locais, e foram projetados controladores chaveados considerando incerteza paramétrica e/ou falha no sistema, sendo o modelo fuzzy válido para uma determinada região de operação, sujeito à saturação na entrada de controle e com rejeição ao torque de carga através do desempenho H_∞ . A utilização da modelagem fuzzy TS considerando incerteza paramétrica e/ou falha estrutural, saturação no sinal de controle e desempenho H_∞ é outra contribuição do trabalho, pois, modelos fuzzy TS foram pouco explorados no controle de máquinas de indução. Todas as análises de desempenho do sistema foram desenvolvidas no *software* Matlab/Simulink.

Palavras-chave: Controle robusto chaveado. Desigualdades matriciais lineares. Fuzzy Takagi-Sugeno. Motor de indução trifásico.

ABSTRACT

The thesis presents the analysis of a control technique for the activation of a three-phase induction motor with squirrel cage rotor (MIT) using robust switched controllers that choose a gain from the state vector feedback controller belonging to a set of known gains, by minimizing the derivative of the quadratic Lyapunov function. The designed controllers used the technique of Linear Matrix Inequalities (LMIs), considering different parametric uncertainties and/or faults in the plant. Through the dynamic equations with vector control and orientation by the rotor flow, the model was represented in state variables and using the Matlab/Simulink software with the mathematical resolution solvers, Yalmip and Sedumi, the behavior of the robust switched controllers compared to the robust controllers showing the superiority of switched controllers. In the sequence, the project of switched controllers for the activation of the MIT was developed with parametric uncertainties and/or failures considering a region of operation (region in which it is guaranteed that the trajectories of the state vector remain inside). It is a differential of the work, for not having in the literature researches with this concept applied in the activation of the MIT. In addition, the existence of saturation at the control input was considered, another relevant topic, because there exist few studies that address this limitation. Finally, Takagi Sugeno (TS) fuzzy modeling of the three-phase induction motor was performed, defining the local models, and switched controllers were designed considering parametric uncertainty and/or system failure, with the fuzzy model valid for a given region of operation, subject to saturation at the control input and with the rejection of the load torque through the H_∞ performance. The use of TS fuzzy modeling considering parametric uncertainty and/or structural failure, saturation in the control signal and H_∞ performance is another contribution of the work, because fuzzy TS models have been studied by few researchers. All system performance analyzes were developed using the Matlab/Simulink software.

Keywords: Robust switched control. Linear matrix inequalities (LMIs). Fuzzy Takagi-Sugeno. Three-phase induction motor.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Matriz do sistema $\in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$
$A(\alpha)$	Matriz do sistema com incertezas $\in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$
$\hat{A}(\alpha)$	Matriz expandida do sistema com ação integral e incertezas
$\hat{B}$	Matriz de entrada expandida do sistema com ação integral
B_m	Coefficiente de atrito viscoso
B	Matriz de entrada $\in \mathbb{R}^{n_x \times n_u}$
B_0	Matriz auxiliar
B_w	Matriz relacionada à atuação do distúrbio do sistema $\in \mathbb{R}^{n_x \times 1}$
$\widehat{B}_w$	Matriz expandida do sistema com ação integral relacionada à atuação do distúrbio do sistema
d	Coordenada de eixo direto
$\mathcal{F}$	Conjunto composto por matrizes diagonais
F_q	Elemento de $\mathcal{F}$, $\in \mathbb{R}^{n_u \times n_u}$
F_q^-	Elemento de $\mathcal{F}$, $\in \mathbb{R}^{n_u \times n_u}$, $F_q^- = I - F_q$
H_i	Matriz relacionada a lei de controle chaveada
i_{ds}^e	Componente de eixo direto da corrente do estator na referência síncrona girante
i_{ds}^{e*}	Referência da componente da corrente de eixo direto na referência síncrona girante
i_{qs}^e	Componente de eixo de quadratura da corrente do estator na referência síncrona girante
i_r	Corrente dos enrolamentos do rotor
i_s	Corrente dos enrolamentos do estator
J	Momento de inércia
K	Controlador com ganho único $\in \mathbb{R}^{n_u \times n_x}$
K_r	Conjunto de politopos do sistema
K_t	Constante de torque
K_σ	Controlador com ganhos chaveados $\in \mathbb{R}^{n_u \times n_x}$
L_m	Indutância mútua
L_r	Indutância própria do rotor
L_s	Indutância própria do estator
M_j	Matriz $\in \mathbb{R}^{n_u \times n_x}$ com $j \in K_r$

M_r	Indutância mútua entre dois enrolamentos do rotor
M_s	Indutância mútua entre dois enrolamentos do estator
M_{sr}	Indutância mútua dos enrolamentos do estator com os enrolamentos do rotor
N_j	Matriz $\in \mathbb{R}^{n_u \times n_x}$ com $j \in K_r$
P	Matriz simétrica positiva definida $\in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$
P_m	Número de pares de polos
q	Coordenada do eixo de quadratura
$\overline{Q_j}$	Matriz simétrica auxiliar, $j \in K_r$
Q_j	Matriz simétrica $\in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$
R_r	Resistência do rotor
R_s	Resistência do estator
r	Número de politopos do sistema
s	Número de parâmetros incertos distintos presentes no sistema
$S(\beta, r, \theta)$	Região do plano complexo (porcentagem de overshoot, tempo de pico e tempo de estabelecimento)
T_L	Torque de carga $\in \mathbb{R}^{n_w}$
T_e	Torque eletromagnético
$u(t)$	Entrada de controle $\in \mathbb{R}^{n_u}$
V_{ds}^e	Componente de eixo direto da tensão do estator na referência síncrona girante
V_{qs}^e	Componente de eixo de quadratura da tensão do estator na referência síncrona girante
V_s	Tensão dos enrolamentos do estator
$x(t)$	Vetor de estado $\in \mathbb{R}^{n_x}$
$\hat{x}(t)$	Vetor de estado expandido do sistema com ação integral
Z	Matriz simétrica positiva definida $\in \mathbb{R}^{n_u \times n_x}$
Z_i	Matriz simétrica $\in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$
Z_σ	Matrizes simétricas positivas definidas $\in \mathbb{R}^{n_u \times n_x}$
ω_e	Velocidade elétrica do estator
ω_r	Velocidade mecânica do rotor
ω_r^*	Referência de velocidade mecânica do rotor
W	Matriz simétrica positiva definida $\in \mathbb{R}^{n_u \times n_x}$
$\emptyset$	Parâmetro que define os limites das restrições físicas correspondentes a região de operação

$\varnothing_{dr}^e$	Componente de eixo direto do fluxo do rotor na referência síncrona girante
$\varnothing_{qr}^e$	Componente de eixo de quadratura do fluxo do rotor na referência síncrona girante
$\varnothing_{dr}^{e*}$	Referência da componente de eixo direto do fluxo do rotor na referência síncrona girante
$\varnothing_s$	Fluxo dos enrolamentos do estator
τ_r	Constante de tempo do rotor
τ_s	Constante de tempo do estator
σ	Coefficiente de dispersão
α_i	Peso normalizado de cada modelo local do sistema
β	Taxa de decaimento
β_{elip}	Constante positiva correspondente a expansão do elipsoide
$\mathcal{L}(L_j)$	Região de saturação
$\mathcal{E}(P, \lambda)$	Conjunto elipsoidal
ε	Distúrbio de energia limitada, constante positiva, sendo esta considerada o valor limitante do torque
ε_0	Parâmetro relacionado à condição inicial
$\mu_{il}(z_l(t))$	Função de pertinência em termos de variáveis incertas e/ou desconhecidos
w	Restrição da norma H_∞
θ	Deslocamento angular
ρ	Parâmetro que define o limite da saturação
φ	Variável de folga
χ	Região de operação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (MIT).....	24
3	PROJETO DE CONTROLADORES ROBUSTOS E CHAVEADOS PARA ACIONAMENTO DO MIT.....	32
3.1	CONTROLADOR ROBUSTO VIA LMIs.....	33
3.2	CONTROLADOR CHAVEADO VIA LMIs.....	34
3.3	CONTROLADOR ROBUSTO COM TAXA DE DECAIMENTO VIA LMIs...	36
3.4	CONTROLADOR ROBUSTO CHAVEADO COM TAXA DE DECAIMENTO VIA LMIs.....	37
3.5	CONTROLADOR ROBUSTO COM D-ESTABILIDADE VIA LMIs.....	38
3.6	CONTROLADOR ROBUSTO CHAVEADO COM D-ESTABILIDADE VIA LMIs.....	39
3.7	PROJETO DOS CONTROLADORES.....	40
3.7.1	Projeto do controlador robusto e robusto chaveado via LMIs.....	43
3.7.2	Projeto do controlador robusto e robusto chaveado com taxa de decaimento via LMIs.....	44
3.7.3	Projeto do controlador robusto e robusto chaveado com D-estabilidade via LMIs.....	45
3.8	ANÁLISE DOS CONTROLADORES.....	46
3.9	ANÁLISE DO CONTROLADOR CHAVEADO COM TAXA DE DECAIMENTO COMPARATIVAMENTE COM OS RESULTADOS DE CHANG <i>et al.</i> (2005).....	57
4	PROJETO DE CONTROLADOR CHAVEADO CONSIDERANDO INCERTEZAS PARAMÉTRICAS, FALHAS, SATURAÇÃO NA ENTRADA DE CONTROLE E DEFINIÇÃO DE REGIÃO DE OPERAÇÃO.....	62

5	PROJETO DO CONTROLADOR CHAVEADO PARA O MIT CONSIDERANDO SATURAÇÃO NO SINAL DE CONTROLE, INCERTEZAS PARAMÉTRICAS E TOLERANTE A DISTÚRPIO DE CARGA UTILIZANDO MODELO FUZZY TS.....	94
5.1	CONTROLADOR CHAVEADO CONSIDERANDO DISTÚRPIO EXTERNO NULO.....	102
5.2	CONTROLADOR CHAVEADO CONSIDERANDO DISTÚRPIO DIFERENTE DE ZERO.....	103
5.3	PROJETO DOS CONTROLADORES CHAVEADOS.....	105
5.4	ANÁLISES DOS CONTROLADORES CHAVEADOS PROJETADOS.....	117
6	CONCLUSÃO.....	126
6.1	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	127
6.2	PUBLICAÇÕES.....	128
	REFERÊNCIAS.....	129

1 INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos (MIT) são usados em muitos setores industriais, sendo o principal elemento de conversão de energia elétrica em mecânica. O MIT é o motor mais vendido, devido suas características de baixo custo, robustez e alta eficiência (PERESADA; TONIELLI; MORICI, 1999; GOEDTEL, 2007; BLANCHINI *et al.*, 2012; DALILA *et al.*, 2013; SPYROPOULOS; MITRONIKAS, 2013; SINGH *et al.*, 2016). Além das aplicações rotineiras outras estão sendo desenvolvidas, como por exemplo, a utilização na tração de barcos (SPYROPOULOS; MITRONIKAS, 2013) e veículos elétricos (AOUAOUDA; CHADLI; BOUKHNIFER, 2016).

Nos países desenvolvidos mais da metade do total da energia produzida é convertida em energia mecânica através de motores elétricos. No Brasil, o setor industrial é responsável por 43% do consumo anual de energia. Dentro deste setor, onde há maior demanda de energia elétrica, os motores são responsáveis por aproximadamente 55% deste consumo. Entre os vários tipos de motores, o motor de indução opera em 90% dos sistemas de acionamento industrial (AZZOLIN, 2008; PUMA, 2010). Acredita-se que atualmente aumentou a porcentagem de utilização do MIT devido as suas novas aplicações.

Durante muitos anos, grande parte das tarefas envolvidas nos processos produtivos operavam em velocidades aproximadamente constantes, não necessitando nenhuma ação de controle sobre os motores ou acionamentos, tais como de posição, velocidade ou torque (LEONHARD, 1986, 1996, 2001).

Até a década de 80, as tarefas que exigiam acionamentos de velocidade variável, controle rápido e preciso da posição ou da velocidade utilizavam somente motores de corrente contínua, por possuírem um desacoplamento entre o controle de fluxo (estabelecido pela corrente de campo) e o controle de torque (estabelecido pela corrente de armadura). Este fato facilita o controle independente da velocidade e do torque, possibilitando um bom desempenho dinâmico do acionamento (AZZOLIN, 2008).

Os MITs substituíram os motores de corrente contínua, devido ao seu menor preço, menor número de manutenções para o mesmo nível de potência, menor peso e menor tamanho (VAS, 1990; AZZOLIN, 2008).

As estratégias de controle no acionamento do MIT variam de acordo com sua aplicação, sendo estas inexistentes (malha aberta), simplificadas ou com grandes exigências dinâmicas.

A primeira estratégia de controle foi o controle escalar, que controla a amplitude da tensão e a frequência, de maneira proporcional, com o objetivo de a manter o fluxo da máquina constante. Com esta estratégia de controle, a velocidade é monitorada a partir da frequência elétrica, procurando manter constante a relação tensão/frequência (V/F).

A tensão da máquina controla o fluxo e a frequência. O escorregamento controla os valores de torque. Contudo, o fluxo e o torque são funções da frequência e da tensão, consequentemente, é impossível ajustar somente um valor sem afetar o outro (BOSE, 2006).

Desta forma, os acionamentos baseados nesta técnica de controle não conseguem atingir desempenhos dinâmicos iguais ou superiores aos dos motores de corrente contínua, devido a este acoplamento. Este tipo de controle é aplicado quando não há necessidade de respostas rápidas a comandos de torque e velocidade.

Alguns estudos foram desenvolvidos utilizando esta técnica, como por exemplo, em Muthoselvan, Dash e Somasundaram (2006) e Suetake, Silva e Goedel (2007, 2010).

O acionamento do MIT de forma semelhante ao do motor de corrente contínua, baseia-se na teoria de controle vetorial desenvolvida pelos trabalhos de Hasse, realizado em 1969, e de Blaschke em 1972, nos quais ocorre o desacoplamento do fluxo e do torque (LEONHARD, 1986, 1996, 2001; BOSE, 2001, 2006).

Este controle baseia-se na representação das equações eletromagnéticas da máquina em um sistema de coordenadas direto e quadratura (dq), com eixo direto (d) alinhado com o vetor de fluxo. Portanto, se faz necessário o conhecimento da posição do vetor fluxo para a orientação do sistema de coordenadas dq. O controle é efetuado mediante variações independentes das correntes responsáveis pelo campo e pelo conjugado. No eixo direto a corrente é responsável pelo campo, no eixo em quadratura a corrente é responsável pelo torque, analogamente ao motor de corrente contínua (KRISHMAN, 2001).

Portanto, a componente de eixo direto da corrente, quando alterada, influencia apenas no fluxo, não causando impacto no torque, e a componente de eixo em quadratura da corrente tem influência exclusivamente sobre o torque, não alterando o fluxo (BOSE, 2001).

O controle vetorial é sensível às variações dos parâmetros da máquina. Desta maneira, o conhecimento de todos os parâmetros elétricos são de suma importância para a realização do controle vetorial (OLIVEIRA, 1998).

A evolução dos microprocessadores e dos sistemas de potência, aliados com teorias de controle proporcionaram o aumento das aplicações do acionamento do MIT com controle vetorial, como por exemplo, ilustradas em Chang *et al.* (2005) e Romero, Seron e De Doná (2010).

Além do controle vetorial, existem os controles Direto de Torque (*Direct Torque Control*, DTC) e Autocontrole Direto (*Direct Self Control*, DSC). Através do DTC ou do DSC, os valores da amplitude do fluxo magnético e do torque eletromagnético são controlados de uma forma separada e direta, através de uma seleção adequada da entrada em condução dos interruptores de potência do inversor (TAKAHASHI; NOGUCHI, 1986; BUJA; CASADEI; SERRA, 1997; BUJA; CASADEI; SERRA, 1998; ZIDANI *et al.*, 2006; MARQUES, 2007; PUMA; SGUAREZI FILHO; RUPPERT, 2011; PATEL *et al.*, 2012; ZHAO *et al.*, 2015).

O avanço dos estudos nestas técnicas possibilitaram a utilização de novos controladores, como:

- controladores com modos deslizantes, como exemplo, pode-se encontrar nas pesquisas desenvolvidas por Hazzab, Bousserhane e Sicard (2006); Jamoussi *et al.* (2013); Masumppoor, Yaghobi e Khanesar (2015);
- redes neurais, em Oguz e Mehmet (2011);
- neuro fuzzy, de acordo com Rigatos (2012); Douiri, Belghazi e Cherkaoui (2015^a); Douiri, Belghazi e Cherkaoui (2015^b); Vahedi, Zarif e Kalat (2015^a); Vahedi, Zarif e Kalat (2015^b);
- controladores robustos, observa-se em Prepain, Postlethwaite e Benchaib (2002); Dalila *et al.* (2013); Hedjar, Boucher e Dumur (2012); Moaveni e Khorshidi (2015);
- outros, como o trabalho elaborado por Blanchini *et al.* (2014).

De uma maneira geral, a execução do controle de posição, velocidade e torque do motor de indução trifásico, utiliza os controladores proporcional integral (PI), proporcional derivativo (PD) e proporcional integral derivativo (PID), os quais são largamente empregados e possuem eficiência conhecida (HOO *et al.*, 2015).

Segundo Bahloul *et al.* (2018), Bahloul *et al.* (2017) e Chen *et al.* (2015), o projeto do acionamento do MIT é desenvolvido considerando os parâmetros nominais da máquina. No entanto, estes parâmetros mudam, além do que, alguns não são disponíveis para medição.

Os sistemas de controle atendem as expectativas do projetista quando o modelo dinâmico utilizado para o desenvolvimento do projeto é preciso. Porém, na grande maioria dos casos, um modelo que considere todas as particularidades do processo é de difícil obtenção. Além disto, as incertezas decorrentes da imprecisão dos valores do conjunto, juntamente, com as perturbações inerentes aos processos, geram problemas no controle do sistema em malha fechada e também, podem não garantir a estabilidade do sistema

(OLIVEIRA, 1998; KRISHMAN, 2001; TRANGBAEK, 2001; BONIVENTO *et al.*, 2004; CHEN *et al.*, 2010; SOLTANPOUR; KHOOBAN; NIKNAM, 2014; GUEZMIL *et al.*, 2019).

Estas características ocorrem no MIT, pois, ele possui uma complexa estrutura magnética que impõe um elevado acoplamento entre o fluxo e o torque eletromagnético, seus parâmetros mudam conforme sua operação, além do que, algumas variáveis do rotor são inacessíveis, dificultando o controle da velocidade e do torque (PERESADA; TONIELLI; MORICI, 1999; JAMOUCSI *et al.*, 2013; ZAAFOURI *et al.*, 2013).

De acordo com Soltanpour, Khooban e Niknam (2014) as incertezas paramétricas no MIT são muito difíceis de serem mensuradas.

Devido às incertezas paramétricas e falhas no equipamento o controle preciso desta máquina não é simples (BLANCHINI *et al.*, 2012; AMRANE *et al.*, 2018).

As falhas acarretam a parada do MIT e, conseqüentemente, a paralisação da produção e possíveis perdas financeiras (SINGH *et al.*, 2016). Além disto, acarretam problemas na operação, vide por exemplo, correntes e tensões desequilibradas, pulsações no torque e velocidade, perda de eficiência, aquecimento excessivo e aumento de perdas elétricas (VAS, 1990; BONIVENTO *et al.*, 2004; SPYROPOULOS; MITRONIKAS, 2013; ZINA *et al.*, 2015; AOUAOUDA; CHADLI; BOUKHNIFER, 2016; ZINA *et al.*, 2016; REZAEI; KHOSROWJERDI, 2016; MERABET; BAHI; DRICI, 2017; GUEZMIL *et al.*, 2017; BOUNEMEUR; CHEMACHEMA; ESSOUNBOULI, 2018; GUEZMIL *et al.*, 2018; GUEZMIL *et al.*, 2019; LAYADI *et al.*, 2019; YETGIN, 2019).

A ocorrência de falhas pode causar até instabilidade do sistema, assim sendo, é necessário que o acionamento utilize um controlador que compense os efeitos das falhas e garanta a confiabilidade e a estabilidade do sistema com um desempenho aceitável (TARBOURIECH; TURNER, 2009; BETIN *et al.*, 2014; HOO *et al.*, 2015; KANDUKURI, 2016; GUEZMIL *et al.*, 2017).

Segundo Rezaei e Khosrowjerdi (2016), as falhas podem produzir, aumento da pulsação do torque, diminuição do torque eletromagnético, aumento das perdas e redução da eficiência.

Em Youssef *et al.* (2017) e Cao e Wang (2018), as falhas geralmente causam grande interrupção nos sistemas práticos e essas podem ser intermitentes, ou seja, permanecem em vigor por um período limitado de tempo e podem se recuperar sem qualquer intervenção. Desta forma, o sistema de controle deve atuar rapidamente para evitar danos na segurança e na confiabilidade do sistema.

De acordo com Allouche *et al.* (2010), Tabbache *et al.* (2012), Spyropoulos e Mitronikas (2013), Aguilera *et al.* (2016), Rezaei e Khosrowjerdi (2016), Rkhis-kammoun *et al.* (2019) e Layadi *et al.* (2019) as principais falhas do motor de indução trifásico são:

- a) falhas no estator – resultam em circuitos abertos ou curtos em um ou mais enrolamentos do estator;
- b) falhas na barra ou no anel da extremidade do rotor;
- c) irregularidades do entreferro (excentricidade);
- d) falhas nos rolamentos e mancais.

Os defeitos no estator estão relacionados com a isolação do enrolamento, isto é decorrente de envelhecimento da fiação, contaminação, umidade, alta vibração, excesso da temperatura operacional, ventilação inadequada, tensão inadequada e sobrecarga persistente (TAVNER *et al.*, 2008; KHALAF; HAIDER, 2010; ZHANG *et al.*, 2011; SPYROPOULOS; MITRONIKAS, 2013; DRICI; BAHİ; MERABET, 2017; MERABET; BAHİ; DRICI, 2017; GUEZMIL *et al.*, 2019).

No rotor, as falhas estão relacionadas com quebra de barras e/ou no anel de curto circuito, sendo estes provenientes de tensões térmicas, mecânicas, magnéticas, residuais, dinâmicas e ambientais (KHALAF; HAIDER, 2010; ZHANG *et al.*, 2011; SPYROPOULOS; MITRONIKAS, 2013; DRICI; BAHİ; MERABET, 2017; TALHAOUİ *et al.*, 2017).

Além das falhas relatadas anteriormente, existe o problema da excentricidade, sendo esta dividida em estática e dinâmica, as quais estão relacionadas com o desalinhamento entre o centro do rotor e o centro rotacional. As principais causas para a excentricidade são: posicionamento incorreto do estator ou do rotor, ovalização do núcleo do estator, desalinhamento dos rolamentos, desalinhamento do rotor, vibração e desgaste dos rolamentos e/ou mancais. Uma excentricidade em torno de 10% é admissível (NANDI; TOLİYAT; LI, 2005).

A danificação do mancal e a quebra dos rolamentos são decorrentes de tensões térmicas, mecânicas, contaminação, corrosão, instalação e lubrificação inadequada acarretando pulsação no torque e na velocidade, diminuindo a eficiência do equipamento (ZHOU; HABETLER; HARLEY, 2007; KHALAF; HAIDER, 2010; ZHANG *et al.*, 2011; SPYROPOULOS; MITRONIKAS, 2013; GLOWACZ, 2019).

Além das falhas no equipamento, podem ocorrer danos no sistema de acionamento e de aquisição de dados, como falhas nos sensores (*encoders* ópticos, tacogeradores, sensores de corrente e tensão), tendo grande importância e influência no desempenho do controle

(ALLOUCHE *et al.*, 2010; TABBACHE *et al.*, 2013; ZINA *et al.*, 2015; BOUROGAOUI; SETHOM; BELKHODJA, 2016; YOUSSEF *et al.*, 2017).

Segundo Tabbache *et al.* (2013), Aguilera *et al.* (2016), Verrelli *et al.* (2018) e Rkhisssi-Kammoun *et al.* (2019), o mau funcionamento desses componentes pode produzir consequências críticas no desempenho do MIT. Normalmente, os sensores pertencentes ao acionamento do MIT, sensores de tensão, corrente e velocidade do rotor, trabalham sob muitos estresses de diferentes origens (térmico, elétrico, mecânico e ambiental), que afetam seriamente a sua durabilidade e interferem no bom funcionamento do sistema (ALLOUCHE *et al.*, 2011; BOUROGAOUI; SETHOM; BELKHODJA, 2016; YOUSSEF *et al.*, 2017; RKHISSI-KAMMOUN *et al.*, 2019).

As falhas nos sensores podem acarretar uma elevação nos valores de corrente e tensão podendo causar danos ao equipamento. Por este motivo, estes valores devem ser limitados (TRANGBAEK, 2001; MORENO-VALENZUELA; SANTIBÁÑEZ, 2012; HOO *et al.*, 2015; GUEZMIL *et al.*, 2019).

Segundo Bounemeur, Chemachema e Essounbouli (2018) os trabalhos que consideram falhas não abordam ocorrência simultâneas, como falha no atuador e no sensor, devido à complexidade de análise.

Segundo Tabbache *et al.* (2013) e Rkhisssi-Kammoun *et al.* (2019), os acionamentos elétricos tolerantes a falhas nos sensores ganharam importância devido ao aumento de aplicações com propulsão elétrica e a necessidade da qualidade dos sinais medidos.

Além da redução do desempenho decorrente das falhas, têm-se também a degradação dos requisitos de projeto do sistema de controle ocasionada pelas incertezas. As incertezas paramétricas são inerentes ao equipamento, pois, durante a sua operação seus parâmetros variam de acordo com a temperatura, umidade, velocidade, tempo de operação, envelhecimento do material e outras causas (VAS, 1993; ORTEGA; ESPINOSA, 1993; TRANGBAEK, 2001; BONIVENTO *et al.*, 2004; AZZOLIN, 2008; BLANCHINI *et al.*, 2012; JAMOSSI *et al.*, 2013; SOLTANPOUR; KHOOBAN; NIKNAM, 2014).

A resistência do rotor varia durante o funcionamento do MIT e, segundo Wit, Ortega e Mareels (1995), o controle da velocidade proposto para o equipamento, submetido a um torque de carga constante é globalmente assintoticamente estável desde que a resistência do rotor seja exatamente conhecida. Além disso, todos os sinais do sistema permanecem uniformemente limitados se o valor estimado da resistência do rotor estiver próximo o suficiente do valor real do equipamento. O sistema se torna instável se a resistência do rotor

for superestimada. Ou seja, o valor da resistência do rotor é um parâmetro crítico no desempenho do sistema.

A variação da resistência do rotor impacta enormemente o desempenho de controle e pode levar a degradação do rastreamento de velocidade e erros de estimativa em regime permanente e durante o transitório (BAHLOUL *et al.*, 2018).

A determinação da resistência do rotor é crucial para a orientação de campo e o consequente desacoplamento (MARINO *et al.*, 2013).

Segundo Rezaei e Khosrowjerdi (2016) os projetos de controladores devem considerar uma variação mínima de 50% na resistência do rotor.

A constante de tempo do rotor também é um parâmetro crítico para o acionamento do MIT, pois, está relacionada também com a indutância do rotor (BAZANELLA; REGINATTO, 2000, 2001).

Além destes parâmetros, o torque de carga e a resistência do estator também são críticos (MARINO; TOMEI; VERRELLI, 2004; CHEN *et al.*, 2015).

Em Traoré, Leon e Glumineau (2012) e Marino, Tomei e Verrelli (2008), em baixas velocidades, o parâmetro mais impactante é a resistência do estator, pois, variações de 20% em baixas velocidades, podem levar o sistema à instabilidade.

Segundo Trangbaek (2001) os valores das resistências do rotor e do estator são difíceis de serem obtidas com precisão durante o funcionamento. Porém, diferentemente da resistência do rotor, a resistência do estator possui uma menor variação durante sua operação, devido à temperatura, por possuir uma melhor ventilação.

Em grande parte dos trabalhos desenvolvidos existe a preocupação com relação à variação/incerteza paramétrica. Porém, em cada caso é considerada uma porcentagem de impacto destes parâmetros.

No trabalho Marino, Tomei e Verrelli (2004) foi adotada uma variação de 10% nos valores das resistências. Em trabalho mais recente, adotou-se uma variação de 100% na resistência do rotor (MARINO; TOMEI; VERRELLI, 2008).

Em Masumpoor, Yaghobi e Khanesar (2015), considerou-se 30% de incerteza na resistência do rotor e 50% no torque de carga.

Em Prepain, Postlethwaite e Benchaib (2002) foi proposto que a resistência do rotor varia em 60% e o torque de carga em 25%.

Em Chen *et al.* (2015) foi efetuada uma análise das influências paramétricas no rendimento do acionamento, além de apresentar os casos de instabilidade.

Assim sendo, fica claro que a identificação paramétrica é imprescindível para a obtenção de um bom desempenho dinâmico (MARINO *et al.*, 2013; CHEN *et al.*, 2015; REZAEI; KHOSROWJERDI, 2016; LAYADI *et al.*, 2019).

Além dos fatos discriminados anteriormente, durante a vida útil do motor, é necessário o desenvolvimento de intervenções para mantê-lo em boas condições. Segundo Bazurto, Quispe e Mendoza (2016), a ocorrência de intervenções no equipamento para manutenção (recondicionamento) reduz em aproximadamente 2% a eficiência com relação ao rendimento obtido em fábrica.

Após o recondicionamento, além da perda de eficiência, ocorre um aumento das variações/incertezas paramétricas afetando o acionamento e o desempenho do MIT.

Segundo Vieira (2017), o aumento nas incertezas dos parâmetros do equipamento estão relacionados a uma falta de padronização no procedimento de recondicionamento de motores entre as empresas, pois, muitas efetuam o serviço de maneira altamente nociva, como por exemplo, aquecimentos inadequados e substituição de cobre por alumínio sem a correta readequação do diâmetro do condutor. Além disto, 45% das empresas pesquisadas que efetuam os serviços de recondicionamento não treinam seus funcionários, ou seja, estes não possuem uma qualificação adequada para o desenvolvimento do serviço.

Assim sendo, após o recondicionamento dos motores é necessária a execução de ajustes no sistema de controle para obtenção de um bom desempenho dinâmico.

A questão dos MITs recondicionados é impactante, pois, segundo Vieira (2017), no ano de 2016, o total de motores trifásicos recondicionados foi da ordem de 4,6 milhões de unidades, de um total instalado de 20 milhões, ou seja, 23% dos MITs instalados no Brasil foram recondicionados.

Além das incertezas/variações paramétricas e falhas do equipamento e do sistema de acionamento, têm-se a necessidade de limitar os sinais de corrente e tensão, para que não ocorra sobrecorrente e/ou sobretensão no conjunto. Esta limitação constitui uma saturação no acionamento do MIT e esta não é considerada nos projetos dos controladores (TRANGBAEK, 2001).

A saturação do atuador é um fenômeno presente em sistemas de controle, sendo este, causado por restrições de sua capacidade de saída. O projeto de controle considerando a saturação do atuador é complexo. Porém, se não for considerado no projeto, pode levar à perda do desempenho, overshoot, tempo de estabilização inadequado e até perda de estabilidade (TARBOURIECH; TURNER, 2009; MORENO-VALENZUELA; SANTIBÁÑEZ, 2012; GAO *et al.*, 2013; HOO *et al.*, 2015).

A saturação no sinal de controle do MIT é desenvolvida inserindo um bloco saturador, e esta metodologia é muito utilizada na literatura e em diversas aplicações industriais. Abordagens de controle que considerem a saturação no projeto do controlador são empregadas em poucos trabalhos como, por exemplo, em Chang *et al.* (2005), Blanchini *et al.* (2012) e Zhao *et al.* (2018).

Devido a todos os fatos descritos, diversos estudos de controladores para acionamento do MIT objetivam melhorar o comportamento dinâmico do conjunto, com o intuito de obter melhores desempenhos, tolerante às variações/incertezas paramétricas, variações no modelo, tolerante a falhas e perturbações de cargas (PERESADA; TONIELLI; MORICI, 1999; BEHAL *et al.*, 2000; BONIVENTO *et al.*, 2004; BLANCHINI *et al.*, 2012; JAMOUISSI *et al.*, 2013; SOLTANPOUR; KHOOBAN; NIKNAM, 2014; HOO *et al.*, 2015; GUEZMIL *et al.*, 2018; GUEZMIL *et al.*, 2019).

Assim sendo, há necessidade constante de pesquisar novas abordagens de otimização e controle que possam ser eficientemente aplicadas nos processos para obtenção de boas respostas, contribuindo para a melhoria da eficiência, produtividade e na redução do consumo de energia elétrica (REGINATTO, 2000; GOEDEL, 2007; BLANCHINI *et al.*, 2012).

Segundo Bahloul *et al.* (2018) mesmo com muitas pesquisas desenvolvidas com o MIT, ainda existe muitos desafios para aplicações de engenharia devido ao aumento da demanda industrial e a exigência de altos níveis de desempenho (robustez).

Em vista disto, este trabalho tem o intuito de contribuir com esta análise, desenvolvendo um estudo da técnica de controladores chaveados no acionamento do MIT, englobando incertezas/variações paramétricas, falhas, saturação no sinal de controle e perturbações de carga.

A idéia da utilização de sistemas chaveados é projetar uma estratégia de chaveamento adequada que seleciona, a cada instante de tempo, um subsistema dinâmico dentre um determinado número de subsistemas disponíveis. Este controle chaveado é projetado de forma que ainda assegure a estabilidade assintótica com a garantia de desempenho adequado, mesmo na presença de incertezas paramétricas e falhas no sistema (DECARLO *et al.*, 2000).

A técnica de controle chaveado já foi empregada em diversos trabalhos com grandes contribuições, por garantir a estabilidade e o desempenho do sistema, como por exemplo em Tanaka, Iwasaki e Wang (2000); Geromel e Colaneri (2006); Cardim (2009); Geromel e Deaecto (2009); Deaecto *et al.* (2010); Deaecto, Geromel e Daafouz (2011); Buzachero (2014); Souza *et al.* (2014); Deaecto e Santos (2015) e outros.

O chaveamento de controladores normalmente fornece um melhor desempenho para o sistema controlado, devido à possibilidade de cada controlador gerar uma melhor resposta em cada condição operacional.

O chaveamento de controladores aplicado no MIT foi utilizado em poucos trabalhos, por exemplo, Diallo, Benbouzid e Makouf (2004) e Benbouzid, Diallo e Zeraoulia (2007). Nestes estudos, ocorre o chaveamento de diferentes metodologias (controlador vetorial indireto, controle vetorial *sensorless* e controle escalar) que são escolhidas através de uma estratégia de decisão de controle, definido por um sistema de detecção de falhas sem a garantia matemática de estabilidade no sistema de troca dos controladores.

A metodologia apresentada neste trabalho difere da utilizada em Diallo, Benbouzid e Makouf (2004) e Benbouzid, Diallo e Zeraoulia (2007), pois, ela não muda a técnica de controle.

Assim sendo, objetiva-se nesta tese fornecer melhores resultados e com menos conservadorismos dos que os obtidos e publicados em Ortunho *et al.* (2016a), Ortunho *et al.* (2016^b), Ortunho *et al.* (2017), Ortunho *et al.* (2019a) e Ortunho *et al.* (2019b), pois, nos artigos publicados, os controladores projetados possuem apenas um ganho e, nesta tese, os controladores projetados são chaveados com mais de um ganho no controlador. Portanto, objetiva-se colaborar com as pesquisas de acionamentos de motores de indução trifásico obtendo boas respostas dinâmicas do sistema considerando uma região de operação do MIT, saturação no sinal de controle, controlador chaveado, incertezas paramétricas, falhas, perturbação de carga e garantia de estabilidade do conjunto.

A tese foi dividida da seguinte forma:

No Capítulo 1, efetuou-se uma breve revisão da literatura informando os principais problemas que ocorrem no motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo.

No Capítulo 2, relatou-se a modelagem do motor de indução trifásico, apresentando suas equações dinâmicas para obtenção do sistema em variáveis de estado.

No Capítulo 3, é desenvolvida a modelagem do motor de indução trifásico sendo efetuado o projeto de controladores robustos com realimentação das variáveis de estado, e o projeto de sistema de controle robusto chaveado com realimentação das variáveis de estado aplicado no acionamento do MIT com incertezas paramétricas e falhas, utilizando LMIs sem a necessidade do monitoramento do sistema para a detecção e isolamento da falha, pois o controlador atua para o fornecimento do melhor desempenho do conjunto.

No Capítulo 4, são apresentados os projetos dos sistemas de controle e resultados de simulação através dos *softwares* Matlab/Simulink, os quais foram elaborados utilizando LMIs, que levam em conta a saturação do sinal de controle visando evitar a sobretensão e

sobrecorrente do conjunto, mantendo as variáveis de estado dentro de uma região de operação, garantindo a estabilidade mesmo com a ocorrência de falhas e/ou incertezas paramétricas no sistema, diante de perturbações de carga.

No Capítulo 5, é desenvolvida a modelagem Fuzzy Takagi Sugeno do motor de indução trifásico e são apresentados os projetos de controladores chaveados, utilizando LMIs, considerando uma região de operação do equipamento que garante a estabilidade global assintótica do sistema, incerteza paramétrica, saturação no sinal de controle e rejeição ao distúrbio. Através de resultados de simulação verifica-se o comportamento do sistema controlado.

Por fim, efetua-se uma conclusão do trabalho apresentando propostas para o desenvolvimento de futuras pesquisas, através de novas ferramentas e estruturas que podem ser desenvolvidas, aperfeiçoadas ou acrescentadas no estudo, possibilitando, desta forma, a melhoria do acionamento do MIT e novas aplicações.

6 CONCLUSÃO

O motor de indução trifásico é um equipamento extremamente importante nos processos industriais e continuamente aumenta-se suas aplicações, devido à sua robustez, menor volume, menor necessidade de manutenções e etc. Porém, seu sistema de controle requer o desacoplamento do fluxo do rotor e, para isto, é necessário o conhecimento dos parâmetros do MIT.

Os parâmetros do MIT se alteram durante a operação devido a diversos fatores, acarretando desta forma, uma imprecisão e consecutivamente, erros de controle, parada do equipamento e/ou processo.

Além disso, os diferentes processos acionados pelo motor de indução trifásico necessitam da modificação da velocidade do equipamento e constantemente ocorrem variações de carga que afetam o desempenho do sistema.

Assim sendo, diferentes pesquisas são desenvolvidas visando tornar o acionamento do MIT mais robusto às diferentes incertezas paramétricas e falhas estruturais, tornando o sistema de controle mais confiável, com melhores dinâmicas e insensíveis as variações.

Portanto, este trabalho estudou a utilização de controladores chaveados robusto, com taxa de decaimento e D-estabilidade utilizando Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs) no acionamento do MIT, com incertezas paramétricas e/ou falhas, verificando seu desempenho comparativamente aos controladores robustos sem chaveamento, sendo possível evidenciar uma melhor dinâmica, seguindo a referência de velocidade estabelecida, constante ou variável, em um menor tempo e menos susceptível a variações do torque de carga.

Evidenciado o melhor desempenho dos controladores chaveados comparativamente aos controladores robustos projetou-se controladores chaveados considerando incertezas na planta adotando uma região de operação à qual garante que todas as trajetórias do vetor de estado estejam contidas. Este fato, é relevante e inovador nas aplicações com acionamento do motor de indução trifásico. Além disso, foi considerado no projeto das LMIs a existência de saturação no sinal de controle, sendo a metodologia adotada diferente da técnica utilizada na literatura (inserção de um bloco saturador no sinal de controle).

As análises desenvolvidas no *software* Simulink para as condições e motor utilizado, constataram que a técnica de controle foi eficiente e, mesmo com a presença de três incertezas paramétricas e/ou falhas, obtiveram-se resultados melhores do que os apresentados na literatura.

Por fim, foi analisado e projetado controladores robustos para o modelo fuzzy Takagi-Sugeno do motor de indução trifásico considerando incerteza na constante de tempo do rotor, sendo o modelo fuzzy válido para uma determinada região de operação, com a consideração da existência de saturação na entrada de controle e rejeição ao torque de carga.

Os resultados obtidos nas análises desenvolvidas com o modelo fuzzy não melhorou a dinâmica do MIT comparativamente aos resultados presentes na literatura, porém, contribui com as pesquisas desenvolvidas por considerar a existência da saturação no sinal de controle e de uma região de operação que garante o funcionamento do sistema. Este fato, não é garantido nos diversos trabalhos presentes na literatura e, por isto, possuem melhores respostas dinâmicas. Porém, dependendo da variação dos parâmetros do equipamento, torque de carga e/ou ocorrência de falhas o sistema, pode se tornar instável.

Além disso, verificou-se que ao eliminar a região de operação do projeto do controlador, para o modelo fuzzy TS, obteve-se ótimas respostas. Portanto, novos estudos e análises utilizando este modelo com a técnica de controle chaveado são importantes.

A utilização da modelagem fuzzy TS considerando incerteza paramétrica e/ou falha estrutural, saturação no sinal de controle e critério de desempenho H_∞ , juntamente com a consideração de uma região de operação e saturação do sinal de controle utilizando a técnica de controle chaveado no acionamento do MIT são outras contribuições do trabalho.

Além disto, a utilização de controladores chaveados também representa uma contribuição, pois proporciona melhores dinâmicas comparativamente ao controlador robusto de único ganho.

6.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

A seguir, segue uma breve sugestão de possíveis trabalhos de pesquisa:

- Desenvolver uma bancada para ensaios de controladores chaveados no acionamento do MIT;
- Desenvolver um protótipo de acionamento do MIT em um veículo elétrico possibilitando testes de diferentes metodologias de controle;
- Extrapolar a análise dos controladores chaveados para o modelo fuzzy Takagi-Sugeno do MIT considerando mais incertezas (constante de tempo do estator) e falhas (atuador, sensores de corrente e velocidade), possibilitando uma excelente rejeição as variações de referência de velocidade e as mudanças do torque de carga;

- Considerar no modelo do MIT o torque de carga como incerteza paramétrica ao invés de um distúrbio;
- Utilizar técnicas de controle que possibilitem a suavização do *chattering*;
- Analisar o sistema de controle chaveado com realimentação de saída considerando incertezas paramétricas, falhas estruturais, região de operação, saturação no sinal de controle e rejeição ao torque de carga;
- Expandir o sistema de controle com realimentação de saída para modelos discretos no tempo.

6.2 PUBLICAÇÕES

ORTUNHO, T. V.; TEIXEIRA, M. C. M.; RIBEIRO, J. M. S.; CARNIATO, A. A.; CARNIATO, L. A.; ALVES, U. N. L. T. Controle robusto com taxa de decaimento e saturação no sinal de controle via LMI para acionamento de um motor de indução trifásico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE - SBAI, 2019, BRASIL. **Proceedings...** Ouro Preto: Minas Gerais, 2019.

ORTUNHO, T. V.; TEIXEIRA, M. C. M.; RIBEIRO, J. M. S.; CARNIATO, A. A.; CARNIATO, L. A.; OLIVEIRA, D. R. de. Acionamento de um motor de indução trifásico com incertezas paramétricas e falha no atuador utilizando controle robusto com taxa de decaimento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE - SBAI, 2019, BRASIL. **Proceedings...** Ouro Preto: Minas Gerais, 2019.

ORTUNHO, T. V.; RIBEIRO, J. M. S.; TEIXEIRA, M. C. M.; CARNIATO, A. A.; CARNIATO, L. A.; RODRIGUES, F. B. Análise de um controlador H_∞ com D-estabilidade projetado para um motor de indução com incertezas. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES - DINCON, 2017, BRASIL. **Proceedings...** São José do Rio Preto: São Paulo, 2017.

ORTUNHO, T. V.; RIBEIRO, J. M. S.; TEIXEIRA, M. C. M.; GARCIA, J. P. F.; ASSUNÇÃO, E. Projeto de controladores robustos via LMI para acionamento de motor de indução trifásico considerando incertezas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 21., 2016, BRASIL. **Proceedings...** Vitória: Espírito Santo, 2016.

ORTUNHO, T. V.; RIBEIRO, J. M. S.; TEIXEIRA, M. C. M.; GARCIA, J. P. F.; ASSUNÇÃO, E. Projeto de controladores robustos com taxa de decaimento via LMI para acionamento de MIT considerando incertezas. In: IEEE /IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 12., 2016, BRASIL. **Proceedings...** Curitiba: Paraná, 2016.

REFERÊNCIAS

ABU-RUB, H.; IQBAL, A.; GUZINSKI, J. **High performance control of ac drives with matlab/simulink**. United Kingdom: Wiley, 2012. 492 p.

ACEVEDO, S. S.; GIRALDO, E.; GIRALDO, D. Speed control of induction motor using robust control with LSDP. In: ELECTRONICS, ROBOTICS AND AUTOMOTIVE MECHANICS CONFERENCE, 2008, [s.l.]. **Proceedings** [...] [S. l.: s. l.], 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/cerma.2008.73>.

AGUILERA, F.; BARRERA, P. M.; ANGELO, C. H.; TREJO, D. R. E. Current-sensor fault detection and isolation for induction-motor drives using a geometric approach. **Control Engineering Practice**, Oxford, v. 53, p.35-46, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.04.014>.

ALLOUCHE, M.; CHAABANE, M.; SOUSSI, M.; TADEO, F.; MEHDI, D. Fuzzy sensor fault-tolerant control of an induction motor. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, Amsterdam, v. 29, p. 713–723, 2015. IOS Press. <http://dx.doi.org/10.3233/ifs-141447>.

ALLOUCHE, M.; CHAABANE, M.; SOUSSI, M.; MEHDI, D.; TADEO, F. State feedback tracking control for indirect field-oriented induction motor using fuzzy approach. **International Journal of Automation and Computing**, Manchester, v.10, n.2, p. 99-110, 2013. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11633-013-0702-4>.

ALLOUCHE, M.; MOHAMED, C.; SOUSSI, M.; MEHDI, D. Takagi Sugeno fuzzy observer design for induction motors with unmeasurable decision variables: state estimation and sensor fault detection. **International Journal of Computer Applications**, [s. l.], v. 23, n. 4, p.44-51, 2011.

ALLOUCHE, M.; CHAABANE, M.; SOUSSI, M.; MEHDI, D.; HAJJAJI, A. Takagi-Sugeno fuzzy sensor faults estimation of an induction motor. In: MEDITERRANEAN CONFERENCE ON CONTROL & AUTOMATION, 18., 2010, Marrakech. **Proceedings** [...] Morocco: IEEE, 2010. p. 243-248.

ALVES, U. N. L. T. **Controle chaveado e chaveado suave de sistemas não lineares incertos via modelos fuzzy T-S**. 2017. 107 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira.

ALVES, U. N. L. T.; TEIXEIRA, M. C. M.; OLIVEIRA, D. R.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E. Smoothing switched control for uncertain T-S fuzzy systems with unknown membership functions, actuator saturation and disturbance. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS (FUZZ-IEEE), 2016a, Vancouver. **Proceedings** [...] Vancouver: Canadá, 2016a.

ALVES, U. N. L. T.; TEIXEIRA, M. C. M.; OLIVEIRA, D. R.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E.; SOUZA, W. A. Smoothing switched control laws for uncertain nonlinear systems subject to actuator saturation. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, Chichester, v. 30, n. 8-10, p.1408-1433, 2016^b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/acs.2671>.

- AMRANE, A.; LARABI, A.; AITOUACHE, A. Unknown input observer design for fault sensor estimation applied to induction machine. **Mathematics and Computers in Simulation**, Amsterdam, p. 1-14, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.09.018>.
- AOUAOUA, S.; CHADLI, M.; BOUKHNIFER, M. Speed sensor fault tolerant controller design for induction motor drive in EV. **Neurocomputing**, [s. l.], v. 214, p. 32-43, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2016.06.001>.
- AOUAOUA, S.; CHADLI, M.; BOUKHNIFER, M.; KARIMI, H. R. Robust fault tolerant tracking controller design for vehicle dynamics: a descriptor approach. **Mechatronics**, Oxford, v. 30, p.316-326, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2014.09.011>.
- AOUAOUA, S.; BOUARAR, T.; BOUHALI, O. Fault tolerant tracking control using unmeasurable premise variables for vehicle dynamics subject to time varying faults. **Journal of the Franklin Institute**, Elmsford, v. 351, n. 9, p.4514-4537, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.05.012>.
- ASSUNÇÃO, E.; ANDREA, C. Q.; TEIXEIRA, M. C. M. Alocação de zeros aplicada a sistemas de controle via LMI. **Sba Controle & Automação**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 55-66, 2007.
- AZIMI, V.; NEKOUI, M. A.; FAKHARIAN, A. Speed and torque control of induction motor by using robust H_{∞} mixed-sensitivity problem via TS fuzzy model. *In*: IRANIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, 20., 2012, Tehran. **Proceedings [...]** Tehran: Irã, 2012.
- AZZOLIN, R. Z. **Identificação automática dos parâmetros elétricos de motores de indução trifásicos**. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- BAHLOUL, M.; CHRIFI-ALAOUI, L.; DRID, S.; SOUISSI, M.; CHAABANE, M. Robust sensorless vector control of an induction machine using multiobjective adaptive fuzzy Luenberger observer. **Isa Transactions**, Pittsburgh, v. 74, p. 144-154, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2018.01.019>.
- BAHLOUL, M.; CHRIFI-ALAOUI, L.; VARGAS, A. N.; CHAABANE, M.; DRID, S. Online robust estimation of flux and load torque in induction motors. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 94, n. 5-8, p. 2703-2713, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-1049-8>.
- BAHLOUL, M.; SOUISSI, M.; CHAABANE, M.; CHRIFI-ALAOUI, L.; DRID, S. Fuzzy speed estimation in the case of sensorless induction machine vector control. **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, Turkish, v. 24, p. 3961-3975, 2016.
- BAHLOUL, M.; SOUISSI, M.; CHAABANE, M.; CHRIFI-ALAOUI, L. Takagi sugeno fuzzy observer based direct rotor field oriented control of induction machine. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS AND CONTROL, 3., 2008, Algeria. **Proceedings [...]** Algiers: Algeria, 2013. p. 29-31.

- BARBI, I. **Eletrônica de potência**. 7. ed. Florianópolis: Editora do Autor, 2012. 315 p.
- BAZANELLA, A. S.; REGINATTO, R. Robust tuning of the speed loop in indirect field oriented control of induction motors. **Automatica**, Amsterdam, v. 37, n. 11, p. 1811-1818, 2001. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0005-1098\(01\)00128-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0005-1098(01)00128-5).
- BAZANELLA, A. S.; REGINATTO, R. Robustness margins for indirect field oriented control of induction motors. **IEEE Transactions on Automatic Control**, New York, v. 45, n. 6, p. 1226-1231, 2000. DOI: 10.1109/9.863613.
- BAZURTO, A. J.; QUISPE, E. C.; MENDOZA, R. C. Causes and failures classification of industrial electric motor. In: IEEE ANDESCON, 2016, AREQUIPA. **Proceedings** [...] Arequipa: Peru, 2016.
- BEHAL, A.; FEEMSTER, M.; DAWSON, D. M.; MANGAL, A. Partial state feedback control of induction motors with magnetic saturation: elimination of flux measurements. In: IEEE CONFERENCE AMERICAN CONTROL. 2000, USA. **Proceedings** [...] Illinois: Chicago, 2000. DOI: 10.1109/ACC.2000.879467.
- BERNUSSOU, J.; PERES, P. L. D.; GEROMEL, J. C. A linear programming oriented procedure for quadratic stabilization of uncertain systems. **Systems & Control Letters**, Amsterdam, v. 13, n. 1, p. 65–72, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-6911\(89\)90022-4](https://doi.org/10.1016/0167-6911(89)90022-4).
- BETIN, F.; CAPOLINO, G. A.; CASADEI, D.; KAWKABANI, B.; BOJOI, R. I.; HARNEFORS, L.; LEVI, E.; PARSA, L.; FAHIMI, B. Trends in electrical machines control: samples for classical, sensorless and fault-tolerant techniques. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, [s. l.], v. 8, n. 2, p.43-55, 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/mie.2014.2313752>.
- BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamento**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2014. 372 p.
- BLANCHINI, F.; CASAGRANDE, D.; MIANI, S.; VIARO, U. Robust linear parameter-varying control of induction motors. **International Journal of Robust and Nonlinear Control**, Barcelona, v. 25, n.12, p.1783-1800, 2014. <https://doi.org/10.1002/rnc.3174>.
- BLANCHINI, F.; CASAGRANDE, D.; MIANI, S.; VIARO, U. An LPV control scheme for induction motors. In: IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 51., 2012, USA. **Proceedings** [...] Maui: Havaí, 2012. 10.1109/CDC.2012.6426618.
- BLANCHINI, F. Set invariance in control. **Automatica**, Elmsford, v. 35, n. 11, p.1747-1767, 1999. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0005-1098\(99\)00113-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0005-1098(99)00113-2).
- BONIVENTO, C.; ISIDORI, A.; MARCONI, L.; PAOLI, A. Implicit fault-tolerant control: application to induction motors. **Automatica**, Amsterdam, v. 40, n. 3, p.355-371, 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2003.10.003>.
- BOSE, B. K. **Power electronics and motor drives-advances and trends**. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- BOSE, B. K. **Modern power electronics and AC drives**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001. 711 p.

BOSE, B. K. **Power electronics and variable frequency drives**. Washington: IEEE Press, 1997a. 660 p.

BOSE, B. K. High performance control and estimation in AC drives. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, CONTROL AND INSTRUMENTATION- IECON, 23., 1997^b, USA, **Proceedings** [...] New Jersey: New Orleans, 1997b.

BOUBZIZI, S.; ABID, H.; KHARRAT, M.; ESSOUNBOULI, N.; CHAABANE, M. Backstepping and TS fuzzy control for induction machine. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCES AND TECHNIQUES OF AUTOMATIC CONTROL & COMPUTER ENGINEERING, 2014, Hammamet. **Proceedings** [...] Tunisia: Hammamet, 2014. p. 59-64.

BOUNEMEUR, A.; CHEMACHEMA, M.; ESSOUNBOULI, N. Indirect adaptive fuzzy fault-tolerant tracking control for MIMO nonlinear systems with actuator and sensor failures. **Isa Transactions**, Pittsburgh, v. 79, p.45-61, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2018.04.014>.

BOUROGAOUI, M.; SETHOM, H. B. A.; BELKHODJA, I. S. Speed/position sensor fault tolerant control in adjustable speed drives: a review. **Isa Transactions**, Pittsburgh, v. 64, p.269-284, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2016.05.003>.

BOYD, S.; GHAOUI, L. E.; FERON, E.; BALAKRISHNAN, V. **Linear matrix inequalities in systems and control theory**. 2. ed. Philadelphia: SIAM Studies in Applied Mathematics, 1994. 193 p.

BUJA, G. CASADEI, D. SERRA, G. Direct stator flux and torque control of an induction motor: theoretical analysis and experimental results. **IEEE Industrial Electronics Society Newsletter**, Washington, v.1, p. 50-64,1998. 10.1109/IECON.1998.723933.

BUJA, G.; CASADEI, D.; SERRA, G. Direct torque control of induction motor drives. **IEEE Industrial Electronics Society Newsletter**, Washington, v. 1, p. 2-8, 1997. DOI: 10.1109/ISIE.1997.651717.

BUZACHERO, L. F. S. **Controle robusto chaveado de sistemas lineares variantes no tempo com aplicação em falhas estruturais**. 2014. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira.

CARDIM, R. **Projeto de controladores baseados em LMIs: realimentação derivativa e sistemas chaveados utilizando estrutura variável**. 2009. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira.

CAO, Y.Y.; LIN, Z. Robust stability analysis and fuzzy-scheduling control for nonlinear systems subject to actuator saturation. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 11, n. 1, p. 57–67, 2003. DOI: 10.1109/TFUZZ.2002.806317.

CAO, L.; WANG, Y. Fault-tolerant control for nonlinear systems with multiple intermittent faults and time-varying delays. **International Journal of Control, Automation and Systems**, [s. l.], v. 16, n. 2, p.609-621, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12555-017-0123-1>.

CHANG, Y.; WANG, Y.; HUNG, M.; CHEN, P. Regional stability and H_∞ performance control of an input-saturated induction motor via LMI approach. **Asian Journal of Control**, Beijing, v. 7, n. 4, p.368-379, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1934-6093.2005.tb00399.x>.

CHEN, B.; YAO, W.; CHEN, F.; LU, Z. Parameter sensitivity in sensorless induction motor drives with the Adaptive Full-Order Observer. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 62, n. 7, p.4307-4318, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/tie.2014.2388197>.

CHEN, H.; WU, C.; CHANG, C.; CHANG, Y.; LIN, H. Integral sliding mode flux observer for sensorless vector controlled induction motors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCE AND ENGINEERING, 2010, TAIWAN. **Proceedings [...]** Taipei: Taiwan, 2010. DOI: 10.1109/ICSSE.2010.5551757.

CHILALI, M.; GAHINET, P. H_∞ design with pole placement constraints: an LMI approach. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Washington, v. 41, n. 3, p.358-367, 1996. DOI: 10.1109/9.486637.

DALILA, K.; ABDESSALEM, M.; SAID, D.; CHRIFI-ALAOUI, L. Robust linear parameter varying induction motor control with polytopic models. **Serbian Journal of Electrical Engineering**, Čačak, v.10, n. 2, p. 335–348, 2013.

DEAECTO, G. S.; SANTOS, G. C. State feedback H_∞ control design of continuous-time switched affine systems. **IET Control Theory & Applications**, Stevenage, v. 9, n. 10, p. 1511–1516, 2015. DOI: 10.1049/iet-cta.2014.0153.

DEAECTO, G. S.; GEROMEL, J. C.; DAAFOUZ, J. Switched state-feedback control for continuous time-varying polytopic systems. **International Journal of Control**, Oxfordshire, v. 84, n. 9, p. 1500–1508, 2011. DOI: 10.1080/00207179.2011.608134.

DEAECTO, G. S.; GEROMEL, J. C.; GARCIA, F. S.; POMILIO, J. A. Switched affine systems control design with application to DC-DC converters. **IET Control Theory & Applications**, Stevenage, v. 4, n. 7, p. 1201 – 1210, 2010. DOI: 10.1049/iet-cta.2009.0246.

DECARLO, R. A.; BRANICKY, M. S.; PETTERSSON, S.; LENNARTSON, B. Perspectives and results on the stability and estabilizability of hybrid systems. In: IEEE, 2000, USA. **Proceedings [...]** [S. l.: s. n.], v.88, 2000, p.1069 – 1081. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/5.871309>.

DOUIRI, M.R.; BELGHAZI, O.; CHERKAOUI, M. Neuro-Fuzzy-Based auto-tuning proportional integral controller for induction motor drive. **International Journal of Computational Intelligence and Applications**, London, v. 14, n. 3, p. 1-22, 2015a. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1469026815500169>.

DOURI, M.R.; BELGHAZI, O.; CHERKAoui, M. Recurrent self-tuning neuro-fuzzy for speed induction motor drive. **Journal of Circuits, Systems, and Computers**, New Jersey, v. 24, n. 9, p. 1550131-1550147, 2015b. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218126615501315>.

DRICI, D.; BAH, T.; MERABET, H. Diagnosis and classification using ANFIS approach of stator and rotor faults in induction machine. **International Journal of Intelligent Engineering Informatics**, [s. l.], v. 5, n. 3, p.267-282, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/ijiei.2017.10007595>.

ESTEVEs, T. T. **Análise da estabilidade de sistemas fuzzy Takagi-Sugeno utilizando as desigualdades de Lyapunov-Metzler**. 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2011.

GAO, S.; DONG, H.; CHEN, Y.; NING, B.; CHEN, G.; YANG, X. Approximation based robust adaptive automatic train control: an approach for actuator saturation. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, New York, v. 14, n. 4, 2013. DOI: 10.1109/TITS.2013.2266255.

GEROMEL, J. C.; DEAEcto, G. S. Switched state feedback control for continuous-time uncertain systems. **Automatica**, Amsterdam, v. 45, n. 2, p. 593–597, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2008.10.010>.

GEROMEL, J. C.; COLANERI, P. Stability and stabilization of continuous-time switched linear systems. **SIAM Journal on Control and Optimization**, Philadelphia, v. 45, n. 5, p. 1915 – 1930, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1137/050646366>.

GLENN, A. J.; SNEHA, A. J. Indirect field oriented speed control of a induction motor drive using takagi-sugeno type of fuzzy logic controller. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TRENDS IN ELECTRICAL ENGINEERING AND ENERGY MANAGEMENT, 2012, [s. l.]. **Proceedings [...]** [s. l.: s. n.], 2012. p. 263-266.

GLOWACZ, A. Fault diagnosis of single-phase induction motor based on acoustic signals. **Mechanical Systems and Signal Processing**, London, v. 117, p. 65-80, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.07.044>.

GOEDTEL, A. **Estimador neural de velocidade para motores de indução trifásicos**. 2007. 159 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo USP - São Carlos, 2007.

GUEZMIL, A.; BERRIRI, H.; PUSCA, R.; SAKLY, A.; ROMARY, R.; MIMOUNI, M. F. High order sliding mode observer-based backstepping fault tolerant control for induction motor. **Asian Journal of Control**, Beijing, v. 21, n. 1, p.33-42, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/asjc.2016>.

GUEZMIL, A.; BERRIRI, H.; PUSCA, R.; SAKLY, A.; ROMARY, R.; MIMOUNI, M. F. Experimental investigation of passive fault tolerant control for induction machine using sliding mode approach. **Asian Journal of Control**, Beijing, v. 21, n. 1, p.520-532, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/asjc.1753>.

GUEZMIL, A.; BERRIRI, H.; PUSCA, R.; SAKLY, A.; ROMARY, R.; MIMOUNI, M. F. Detecting inter-turn short-circuit fault in induction machine using high-order sliding mode observer: simulation and experimental verification. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, [s. l.], v. 28, n. 4, p. 532-540, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40313-017-0314-2>.

HAMMOUDI, M. Y.; BENBOUZID, M. E. H.; RIZOUG, N.; ALLAG, A. New state observer based on takagi-sugeno fuzzy controller of induction motor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS AND CONTROL, 2015, Sousse. **Proceedings [...]** Tunisia: Sousse, 2015. p. 145-150.

HAZZAB, A.; BOUSSERHANE, I. K.; SICARD, P. Fuzzy soft-switching law of an adaptive sliding mode controller for induction motor speed control. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, CANADA. **Proceedings [...]** Montreal: Quebec, 2006.

HEDJAR, R.; BOUCHER, P.; DUMUR, D. Robust nonlinear receding: horizon control of induction motors. **Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, n. 46, p. 353-365, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.10.007>.

HOO, C. L.; Haris, S. M.; CHUNG, E. C. Y.; MOHAMED, N. A. N. New integral antiwindup scheme for PI motor speed control. **Asian Journal of Control**, Beijing, v. 17, n. 6, p. 2115-2132, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/asjc.1144>.

HU, T.; LIN, Z.; CHEN, B. M. An analysis and design method for linear systems subject to actuator saturation and disturbance. **Automatica**, Elmsford, v. 38, n. 2, p. 351-359, 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0005-1098\(01\)00209-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0005-1098(01)00209-6).

HU, J.; YIN, D.; HORI, Y. Fault-tolerant traction control of electric vehicles. **Control Engineering Practice**, Oxford, v. 19, n. 2, p.204-213, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.11.012>.

JAMOUSSE, K. *et al.* Robust Sliding Mode Control Using Adaptive Switching Gain for Induction Motors. **International Journal of Automation and Computing**, [s. l.], v. 10, n. 4, p.303-311, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11633-013-0725-x>.

KANDUKURI, S. T.; KLAUSEN, A.; KARIMI, H. R.; ROBBERSMYR, K. G. A review of diagnostics and prognostics of low-speed machinery towards wind turbine farm-level health management. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 53, p. 697-708, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.061>.

KHALAF, G. S.; Haider, A. F. M. Diagnosis and fault tolerant control of the Induction motors techniques a review. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 227-246, 2010.

KRAUSE, P. C.; WASYNCRUCK, C.; SUCHOFF, S. D. **Analysis of electric machinery and drive systems**. 3. ed. New Jersey: Piscataway, 2013. 613 p.

KRISHMAN, R. **Electric motor drives modeling, analysis and control**. Upper Saddle: New Jersey, 2001. 652 p.