

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**Nathan Augusto Zacarias Xavier**

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE SINTONIA ONLINE PARA SISTEMAS DE  
CONTROLE SENSORLESS APLICADOS AO IPMSM**

Belo Horizonte  
2016

**Nathan Augusto Zacarias Xavier**

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE SINTONIA ONLINE PARA SISTEMAS DE  
CONTROLE SENSORLESS APLICADOS AO IPMSM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Cató-  
lica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Zélia Myriam Assis Peixoto

Coorientador: Profa. Dra. Flávia Magalhães Freitas Fer-  
reira

Belo Horizonte

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

X3a

Xavier, Nathan Augusto Zacarias

Análise de métodos de sintonia online para sistemas I controle sensorless  
aplicados ao IPMSM / Nathan Augusto Zacarias Xavier. Belo Horizonte, 2016.

74 f. : il.

Orientadora: Zélia Myriam Assis Peixoto

Coorientadora: Flávia Magalhães Freitas Ferreira

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Máquinas elétricas síncronas. 2. Acionamento elétrico. 3. Controle automático. 4. MATLAB (Programa de computador) - Simulação (Computadores). 5. Controle em modos deslizantes. I. Peixoto, Zélia Myriam Assis. II. Ferreira, Flávia Magalhães Freitas. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.313.32

**Nathan Augusto Zacarias Xavier**

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE SINTONIA ONLINE PARA SISTEMAS DE  
CONTROLE SENSORLESS APLICADOS AO IPMSM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

---

Prof. Dr. Paulo Fernando Seixas- UFMG

---

Profa. Dra. Zélia Myriam Assis Peixoto (Orientadora) - PUC Minas

---

Prof. Dr. Maury Meirelles Gouvea Junior- PUC Minas

---

Profa. Dra. Flávia Magalhães Freitas Ferreira (Coorientadora) - PUC Minas(Suplente)

Belo Horizonte, 26 de Outubro 2016.

Dedico este trabalho a todos os meus professores: leigos, técnicos, mestres e doutores. Como bom aluno, armazenei em minha memória toda a luz que irradiaram. Luzes sobre valores, respeito e crenças. Luzes sobre vida, amores e esperança.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me suportaram, literalmente, por todos esses anos. Meus pais, Nelson e Sônia, irmãos, Faber e Wender e minha companheira Amanda. Hoje sei que só estou onde estou devido aos ensinamentos e puxões de orelha que recebi por todo esse caminho que trilhei.

Agradeço à minha orientadora Profa. Dra. Zélia Myriam e coorientadora Profa. Dra. Flávia pelos conhecimentos e discussões de assuntos diversos. Vocês me fizeram crescer mais do que apenas no conhecimento. Muito obrigado pela dedicação e entusiasmo.

Aos demais professores e funcionários do PPGEE e da PUC Minas, a qual considero minha segunda casa. Aprendi que o trabalho nos bastidores, apesar de muitas vezes não ser valorizado, é um dos principais responsáveis pela perseverança e força dos alunos. A todos, agradeço infinitamente.

Agradeço, por fim, à CAPES pela concessão da minha bolsa de estudo. Muitos dizem que devemos sonhar cada vez mais alto, mas não ensinam como pegar o impulso correto para alcançar o sonho. Neste caso, a bolsa de estudos foi uma parte fundamental do impulso.

*"Viver, viver e ser livre. Saber dar valor para as coisas mais simples. Só o amor constrói pontes indestrutíveis."* (CBJR, 2016)

## RESUMO

Este trabalho trata sobre sistemas de acionamento elétrico à máquina síncrona a ímãs permanentes internos (IPMSM - *Internal Permanent Magnet Synchronous Motor*) com ênfase no controle de velocidade sem a utilização de sensores eletromecânicos ou *sensorless*. A não utilização de sensores eletromecânicos apresenta-se como uma boa alternativa para o aumento da robustez mecânica e a redução das dimensões físicas, custos de fabricação e intervenções de manutenção. Dentre as diversas técnicas disponíveis para a observação de estados, foi selecionado o Filtro de Kalman Estendido (EKF - *Extended Kalman Filter*) com base no crescente número de publicações técnico-científicas na atualidade, bom desempenho e facilidade quanto à implementação digital futura. Nas aplicações em sistemas de acionamento elétrico, o Filtro de Kalman é usualmente aplicado para a estimação de estados que não sejam facilmente acessíveis por meio de medições, como por exemplo, a velocidade e o fluxo eletromagnético, a qual é realizada a partir de estados mensuráveis e das propriedades estatísticas dos erros de modelagem e de medição. Alguns dos aspectos fundamentais ao bom desempenho dos sistemas referem-se à robustez paramétrica e à presença de distúrbios nas medições utilizadas. Neste sentido, foram também avaliadas técnicas de sintonia *a priori* e de auto-sintonia, dentre elas, versões adaptadas do método da estimação de máxima probabilidade (MMLE - *Method of Maximum Likelihood Estimation*), associação a um controlador PID e um sistema adaptativo por modelo de referência (MRAS - *Model Reference Adaptive System*). As validações das técnicas são realizadas por meio de simulações em ambiente MatLab<sup>®</sup>, tendo-se constatado reduções significativas das oscilações nas respostas do sistema em torno de 79% e 88% nos controles de velocidade e posição, respectivamente, quando utilizadas técnicas de sintonia *online*. O MRAS, por sua vez, foi capaz de reduzir o erro de estimação de velocidade com rápida resposta diante de alterações paramétricas do IPMSM.

**Palavras-chave:** Controle *Sensorless*, Filtro de Kalman Estendido, Motor Síncrono a Ímãs Permanentes Internos, Sintonia *Online*, Sistema Adaptativo por Modelo de Referência.

## ABSTRACT

This work deals with electric drive systems for internal permanent magnet synchronous motor (IPMSM) with emphasis on speed control without the use of electromechanical sensors or sensorless. Not use electromechanical sensors presents as a good practice for increasing the mechanical robustness and reduce physical size, manufacturing cost and maintenance interventions. Among the various techniques available for state observing, was selected the Extended Kalman Filter (EKF) based on the increasing number of technical and scientific publications at present moment, good performance and ease digital implementation on the future. In drive system applications, the Kalman Filter is usually applied as state estimation that are not easily accessible by measurements, for example, the speed and electromagnetic flux, which is made from measurable states and the statistical properties of modelling and measurement errors. Some fundamental aspects for the good performance of the system refer to the parametric robustness and the presence of disturbances at the measurements used. In this sense, were also evaluated initial tune techniques and self-tuning, among them, adapted versions of the method of maximum likelihood estimation (MMLE), association with a PID controller and a model reference adaptive system (MRAS). The validation of the techniques is performed through simulations in MatLab<sup>®</sup>, having found significant reduction of the oscillations in the system response around 79% and 88% at speed and position controls, respectively, when used online tune techniques. The MRAS, in turn, was able to reduce the speed estimated error with response against parametric change of the IPMSM.

**Keywords:** Sensoless Control, Extended Kalman Filter, Permanent Magnet Synchronous Motor, Online Tuning, Model Reference Adaptive System