

**SEU NOME**

**SEU TÍTULO**

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. José de Oliveira

**Coorientadora:** Profa. Dra. Mariana Santos Matos Cavalca

**JOINVILLE**

**2016**



## **RESUMO**

Coloque seu resumo

**Palavras-chave:** Coloque as palavras chave



## **ABSTRACT**

Put your abstract

**Keywords:** Put you keywords



## **LISTA DE FIGURAS**

1.1 Circuito de acionamento de PMSMs . . . . .	19
1.2 Malha genérica de controladores preditivos. . . . .	20





## **LISTA DE TABELAS**



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS ESTRANGEIRAS**



## **LISTA DE SÍMBOLOS**





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	ESSA É UMA SEÇÃO	21
1.1.1	Essa é uma subseção	21
<b>2</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>23</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>27</b>



## 1 INTRODUÇÃO

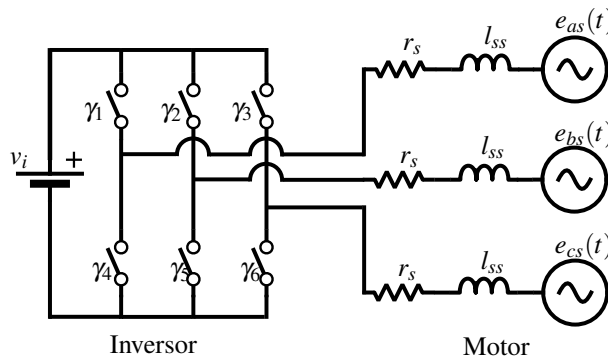
A área de máquinas elétricas e acionamentos é considerada a mais complexa dentro da eletrônica de potência, pois possui um caráter multidisciplinar e explora dinâmicas não-lineares não usuais na teoria de controle (BOSE, 2015). Essa área se divide em três ramos principais: projeto e análise de máquinas, controle de máquinas e estimação e identificação de parâmetros (BOSE, 2015).

Este trabalho concentra-se na área de controle de máquinas elétricas. Dessa forma, além de serem estudadas as técnicas tradicionais de acionamento, são apresentadas estratégias de controle preditivo para acionamento do motor síncrono de ímãs permanentes (PMSM – *permanent magnet synchronous motor*).

Recentemente, os PMSMs têm ganhado espaço nos mais diversos ramos da indústria, desde aplicações automotivas a aplicações em eletrodomésticos da linha branca. Desse modo, pesquisas envolvendo sobretudo técnicas de projeto e de acionamento relativas a PMSMs têm ganhado destaque, por parte da comunidade acadêmica (NIU et al., 2016).

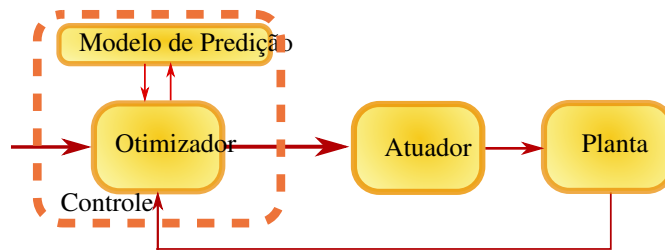
A estrutura tradicionalmente aplicada ao acionamento de PMSMs é apresentada na Figura 1.1 (PILLAY; KRINSHNAN, 1988). Essa estrutura de acionamento utiliza um inversor trifásico de dois níveis. A título de modelagem, supõe-se que os interruptores eletrônicos sejam bidirecionais e sem perdas. O motor é apresentado através de um modelo de circuito equivalente, com parâmetros concentrados. Ao longo desse trabalho, admite-se que essa estrutura de acionamento está sendo utilizada, tanto para simulação quando para interpretação de resultados experimentais, salvo quando mencionado o contrário.

Figura 1.1 – Circuito de acionamento de PMSMs



Fonte: Produção do autor. Nessa estrutura, os interruptores eletrônicos são bidirecionais e sem perdas, o barramento de corrente contínua é considerado ideal (fonte de tensão) e o motor é modelado como uma carga do tipo resistência, indutância e força contra-eletromotriz.

Figura 1.2 – Malha genérica de controladores preditivos.



Fonte: Produção do autor. A estrutura interna do controle preditivo possui um modelo de predição, que permite prever o comportamento futuro da planta, e um otimizador, que para um dado índice de desempenho otimiza as ações de controle futuras.

Baseadas nessa estrutura, diversas técnicas de controle têm sido desenvolvidas para o acionamento de PMSMs. Algumas dessas técnicas serão apresentadas ao final do Capítulo ??, que em seu início discute diferentes possibilidades para modelar o motor propriamente dito.

Entretanto, a técnica alvo do presente trabalho é o controle preditivo baseado em modelo (MPC – *model-based predictive control*). O estudo dessa técnica se concentra no Capítulo ??.

Estratégias de controle MPC surgiram na década de 1970, na indústria petroquímica (QIN; BADGWELL, 2003). Posteriormente, essas técnicas iniciais de MPC foram fundamentadas e melhor desenvolvidas academicamente. Esses estudos geraram conceitos gerais para projeto daqueles controladores (MAYNE, 2014). Esses conceitos se expandiram, de modo que tornaram-se uma filosofia que impulsionou uma numerosa criação de novos algoritmos baseados nos mesmos princípios dos controladores originais. De fato, a classe de controladores MPC permaneceu restrita a aplicação em plantas com dinâmicas lentas, com base de tempo na ordem de horas ou até dias, devido ao elevado número de cálculos necessários para a predição do comportamento do processo antes aplicar a ação de controle.

No entanto, o advento de tecnologias capazes de realizar maior processamento computacional, a um custo reduzido, permitiu empregar técnicas MPC em plantas de dinâmica na ordem de frações de segundo.

Assim, controladores MPC têm gerado um alto interesse na área de eletrônica de potência nos últimos anos, em decorrência de uma série de benefícios proporcionados por esses, tais como a minimização de uma dada função custo e o tratamento de restrições (VAZQUEZ et al., 2014). A malha básica de controle preditivo é apresentada na Figura 1.2. Verifica-se que o controlador preditivo possui um modelo interno de predição. Esse modelo é utilizado para, por exemplo, minimizar uma função custo que considera, usualmente, entre outros parâmetros, erros de rastreamento futuros. Isso possibilita otimizar as ações de controle futuras escolhidas.

Dessa forma, o objetivo geral desse trabalho é propor e validar experimentalmente uma estratégia de controle preditivo não-linear para o acionamento de PMSMs.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- realizar a modelagem do PMSM;
- estudar as principais estratégias de controle e acionamento de PMSMs;
- realizar estudo de casos a respeito da aplicação do controle preditivo em PMSMs;
- desenvolver uma estratégia de controle que possa ser implementada em um *hardware* comercial;
- validar requisitos de segurança e eficiência da estratégia proposta, em relação à técnicas tradicionais de acionamento de PMSMs.

Considerando os objetivos elencados, esse trabalho está disposto em cinco capítulos, sendo o primeiro este capítulo introdutório. No Capítulo ??, apresentam-se possíveis modelos aplicáveis a PMSMs e as principais técnicas de acionamento para o mesmo. No Capítulo ??, são apresentados os conceitos fundamentais de estratégias de controle preditivo. Estudos de caso também são realizados, exibindo meios de aplicação do MPC em PMSMs. A estratégia de controle proposta e os detalhes de sua implementação prática são tratados no Capítulo ??. As considerações finais e sugestões de trabalhos futuros são feitas no Capítulo 2.

## 1.1 ESSA É UMA SEÇÃO

### 1.1.1 Essa é uma subseção



## 2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, um estudo sobre a utilização de controladores preditivos baseados em modelo no acionamento de PMSMs foi realizado. Foram desenvolvidos três estudos de caso com o intuito de ilustrar o uso dessa filosofia de controladores nessa aplicação. Os controladores estudados possuem relação com as técnicas tradicionais de acionamento de PMSMs.

Com base nesses estudos, uma estratégia alternativa de controlador preditivo, o 2MPC+6S, capaz de tratar restrições, foi implementada em uma plataforma experimental de acionamento de um motor BLDC.

Os resultados observados mostraram-se promissores, sobretudo se comparados aos acionamentos tradicionais do tipo *six-step*, que usam controladores proporcionais-integrais ou por histerese.

Como principais dificuldades observadas na implementação do controlador destacam-se:

- grande esforço para implementação do controlador em um *hardware* com limitações de resolução de variáveis (utilizou-se variáveis em 16 *bits*), em ponto fixo, por unidade;
- necessidade de uso da linguagem *Assembly* para redução do custo computacional;
- dificuldade de medição de corrente na plataforma, o que levou ao desenvolvimento de um modelo alternativo para o motor, com o uso de uma corrente equivalente;
- baixa indutância do motor, que obriga frequências de comutação muito elevadas para redução de oscilações de torque, o que é bastante crítico para aplicação de um controlador com alto custo computacional e que impõe que a frequência de comutação seja, no máximo, um sexto da frequência de amostragem;
- alta suscetibilidade a ruídos com o uso da expansão em variáveis incrementais, para inclusão de ação integral, de modo a ser necessária a alteração do tipo de expansão na realização dos experimentos.

As vantagens observadas com o uso do 2MPC+6S:

- capacidade de tratamento de restrições, no projeto do acionamento;
- baixa frequência de operação, reduzindo perdas de comutação no inversor;
- minimização da corrente em comparação com controladores por histerese ou PWM, reduzindo as perdas de condução do inversor;

- sintonia de poucos parâmetros, especialmente com o uso de controladores proporcionais na malha externa, o que torna o controle intuitivo e de fácil entendimento;
- facilidade de expansão para tratamento de outras variáveis presentes no acionamento;
- possibilidade de implementação em *hardwares* comerciais atuais, visto que o controlador foi desenvolvido em ponto fixo, com quase todas as variáveis em 16 *bits*.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- ▷ implementação experimental dos controladores avaliados no segundo e no terceiro estudos de caso;
- ▷ desenvolvimento de custo de atração para permitir, ao controlador desenvolvido, operação em MTPA ou em enfraquecimento de campo;
- ▷ melhorias na medição de corrente da plataforma experimental;
- ▷ implementação do controlador desenvolvido para controle direto de torque ou rotação.

Os artigos abaixo foram publicados (ou estão nos tramites de publicação) ao longo desse trabalho de mestrado:

- BARTSCH, A. G.; NEGRI, G. H.; SCALABRIN, C. R.; CAVALCA, M. S. M.; NIED, A.; DE OLIVEIRA, J.; *Predictive Control Approach for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive*. **Revista Eletrônica de Potência**, 2016.
- BARTSCH, A. G.; DO NASCIMENTO, G.; SACURAE, F. S.; NIED, A.; DE OLIVEIRA, J.; *Computational Cost Evaluation Method to Embedded Digital Control Systems*. **Revista IEEE Latin America**, 2016.
- LICARIAO NOGUEIRA, A. F.; MALDONADO, L. J. A. S. ; MELO, D. M. ; DEVEGILI, K. M. ; BARTSCH, A. G. . *Determination Of Equivalent Electric Circuit Parameters of Single-Phase Power Transformers with Different Number of Winding Turns*. **International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences**, vol. 22, no. 3, Março, 2015.
- BARTSCH, A. G.; NIED, A.; de OLIVEIRA, J.; CAVALCA, M. S. M.; *Evaluation of constrained and unconstrained SESSMPC applied in FivePhase PMSM*. **In: 24th International Symposium in Industrial Electronics (ISIE)**, Junho, 2015, p. 494 – 499.



- BARTSCH, A. G.; NIED, A.; de OLIVEIRA, J.; CAVALCA, M. S. M.; *Evaluation of constrained SESSMPC to drive a Three-Phase PMSM applied in washing machines*. **In: 24th International Symposium in Industrial Electronics (ISIE)**, Junho, 2015, p. 500 – 505.

Espera-se, contudo, a publicação em periódicos científicos de outros resultados contidos no presente trabalho.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOSE, B. Doing research in power electronics [my view]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 2015. v. 9, n. 1, p. 6–17, Março 2015.

MAYNE, D. Q. Model predictive control: Recent developments and future promise. **Automatica**, 2014. v. 50, p. 2967–2986, November 2014.

NIU, F.; WANG, B.; BABEL, A.; LI, K.; STRANGAS, E. Comparative evaluation of direct torque control strategies for permanent magnet synchronous machines. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2016. v. 31, n. 2, p. 1408–1424, Fevereiro 2016.

PILLAY, P.; KRINSHNAN, R. Modeling of permanent magnet motor drives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1988. v. 35, n. 4, p. 537–541, Novembro 1988.

QIN, S. J.; BADGWELL, T. A. A survey of industrial model predictive control technology. **Control Engineering Practice**, 2003. v. 11, p. 733–764, 2003.

VAZQUEZ, S.; LEON, J.; FRANQUELO, L.; RODRIGUEZ, J.; YOUNG, H.; MARQUEZ, A.; ZANCHETTA, P. Model predictive control: A review of its applications in power electronics. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 2014. v. 8, n. 1, p. 16–31, Março 2014.