

Research Project Proposal

Post-doctorate in Canada - CNPq / Vale / Mitacs

<u>Post-doctorate Scholarship Candidate:</u> Dr. Moisés Ferber de Vieira Lessa Federal University of Santa Catarina Rua Dr. João Colin, 2700 - Sala E109a Joinville - SC - Brazil, CEP 89.218-035 moises.ferber@ufsc.br	<u>Canadian advisor:</u> Prof. Dr. Jérôme Cros Pavillon Adrien-Pouliot 1065, avenue de la Médecine Local 2322B - Université Laval - Canada Jerome.Cros@gel.ulaval.ca
---	--

Robustness Analysis of Electric Machines with Applications in Renewable Energy

Introduction and Motivation

Renewable energy has become one of the most important research topics in the last decades due to several reasons, such as increased public awareness for environmental protection, increased level of CO_2 emissions and common desire for sustainable energy resources. Some of the most important renewable energy resources are: photovoltaic, wind, hydro, biomass, geothermal, ocean waves and ocean tides [1]. Often, the energy originating from renewable sources must be first converted to electricity, so that it can later be used in applications related to our general human needs. Thus, the process of energy conversion is fundamental in renewable energy systems and it has been studied for over a century. In particular, renewable energy conversion via electric machines plays a key role in today's renewable energy conversion systems [2].

Nowadays, with the development of modern computers, analysis and design of electric machines rely heavily on computer simulations. Numerical methods, such as the Finite-Element Method (FEM), can accurately compute the electric and magnetic fields inside an arbitrary electric machine. This technique is often called virtual prototyping, since it keeps the engineers from building physical prototypes each time they want to evaluate a new machine design. In this manner, the analysis and design of electric machines can be carried out much faster at a significant lower cost [3].

Even though the existing numerical tools can efficiently compute electric and magnetic fields of a given electric machine design - thus predicting its behavior - in reality, when several electric machines are fabricated and put into use in renewable energy conversion systems, they are subject to uncertainty [4]. The uncertainty may be present due to several reasons, such as production dispersion in the fabrication process, aging, ambient temperature variation and unknown load demand. These variations in fabrication and operation conditions may cause reduced performance and even failure. Thus, it is of great interest to minimize the impact of uncertainty on electric machines. Such machines may be called robust electric machines.

In order to accomplish a robust design, it is crucial to develop efficient robustness analysis methods for electric machines. This problem can be considered in a deterministic or stochastic framework. A more detailed discussion about these two distinct approaches of uncertainty quantification can be found in [5]. In the next section, the problem considered in this project will be presented.

Problem Considered

In this project, we will consider the problem of robustness analysis of electric machines, both in time and frequency domain. This problem can be described as follows. Given an arbitrary electric machine design with N uncertain parameters and a description of the uncertainty, determine the effect of these uncertainties on M variables of interest.

The electric machine design is described by the type of machine being considered, for example an AC asynchronous machine or a DC brushless motor, and its material and geometric properties. The value of these properties may be subject to uncertainty and thus they belong to the N dimensional uncertain parameters space. The uncertainty description may be given, for each uncertain parameter, as an average and standard deviation, a probability density function or an interval with minimum and maximum values. Finally, the M variables of interest are quantities which are relevant to the electric machine project, such as the torque, the efficiency or the conducted emissions generated by the machine.

Objectives

The main objective of this project is to develop methods to solve the problem considered and have the following properties: low computational complexity and high accuracy. These objectives are obviously conflicting. However, the state-of-the-art in uncertainty quantification offers some very interesting methods to solve the proposed problem. To the post-doctorate candidate and advisor's best knowledge, these methods have not been applied extensively to electric machine analysis and design yet. Some examples of these methods can be found in [5,6,7].

Methodology

The methodology of this project will be based on two uncertainty quantification methods that have already been developed but have not been adapted and applied extensively to electric machines: the Unscented Transform (UT) [8] and a method based on Convex Optimization [5]. The first method is appropriate for the stochastic framework of uncertainty quantification whereas the second one is appropriate for the deterministic framework.

The first method is a non-intrusive approach of uncertainty analysis, as it can be seen in Figure 1. It may be combined with Finite Element Modelling (FEM) software in order to compute stochastic moments of variables of interest. The post-doctorate candidate of this proposal has experience with this method and has applied it to problems related to Electromagnetic Compatibility (EMC).

The expertise of the Canadian advisor is mainly related to analysis and design of electric machines and drives, with some work on uncertainty analysis already published [9]. Thus, we propose to combine our expertise to apply this first method of uncertainty quantification in electric machines for renewable energy applications.

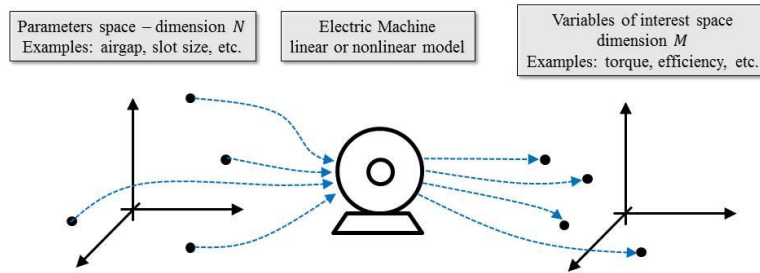


Figure 1 - Overview diagram of Unscented Transform applied to Electric Machines for the Uncertainty Quantification problem

The second method is an intrusive approach and its theoretical foundations are based on Robust Control Theory and Convex Optimization. An overview diagram of this method is presented in Figure 2. In this method, the electric machine is modelled by its Linear Fractional Transformation (LFT). The LFT is presented in the diagram shown in Figure 2, where M is the nominal part of the machine and Δ is the uncertainty block. The problem of evaluating the robustness of the machine is seen as a convex optimization problem. There are very powerful tools available today to solve this problem, even when hundreds of uncertain parameters are considered [5].

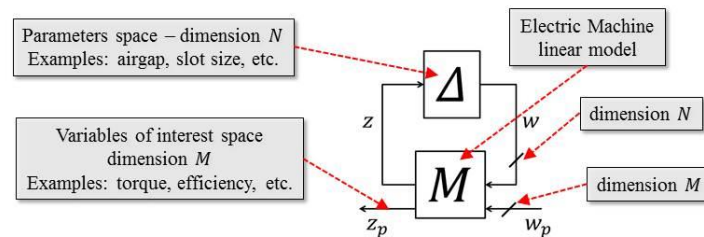


Figure 2 - Overview diagram of Robust Control Theory on the context of Robustness Analysis of Electric Machines

As a validation strategy, we intend to use the classical Monte Carlo method for uncertainty quantification. Even though this method requires typically thousands of simulations of an electric machine in order to compute averages, standard deviations, PDF's and etc., its results are very close to the correct results.

Experiments

We will confront the proposed methodology with experiments in the Electrical and Power Electronics Laboratory (LEEPCI), at Université Laval, where the Canadian advisor carries out his main research activities. The research infrastructure of LEEPCI, in Canada, will improve significantly the quality of the proposed work. In Figure 3, it is shown some of the testbeds to be used in our project.

References

- [1] M. H. Nehrir et al., “A Review of Hybrid Renewable/Alternative Energy Systems for Electric Power Generation: Configurations, Control, and Applications,” in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 392-403, Oct. 2011.
- [2] Bent Sørensen, “Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage,” Academic Press, Burlington, 2007.
- [3] J. P. A. Bastos, N. Sadowski, “Magnetic Materials and 3D Finite Element Modeling”, New York, USA CRC Press (Taylor & Francis Group) - 295pp, ISBN 978-1-4665-9251-3 , 2013.
- [4] P. Offermann, H. Mac, T. T. Nguyen, S. Clénet, H. De Gersem and K. Hameyer, “Uncertainty Quantification and Sensitivity Analysis in Electrical Machines With Stochastically Varying Machine Parameters,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 3, pp. 1-4, March 2015.
- [5] M. Ferber, A. Korniienko, G. Scorletti, C. Vollaïre, F. Morel and L. Krähenbühl, “Systematic LFT Derivation of Uncertain Electrical Circuits for the Worst-Case Tolerance Analysis,” in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 5, pp. 937-946, Oct. 2015.
- [6] M. Ferber, C. Vollaïre, L. Krähenbühl, J. L. Coulomb and J. A. Vasconcelos, “Conducted EMI of DC–DC Converters With Parametric Uncertainties,” in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 4, pp. 699-706, Aug. 2013.
- [7] Ferber, M.; Vollaïre, C. ; Krähenbühl, L. ; Vasconcelos, J. A. . “Adaptive Unscented Transform for Uncertainty Quantification in EMC Large-Scale Systems,” *Compel (Bradford)*, v. 33, p. 1, 2014.
- [8] L. R. A. X. de Menezes, A. Ajayi, C. Christopoulos, P. Sewell and G. A. Borges, “Efficient computation of stochastic electromagnetic problems using unscented transforms,” in *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 88-95, March 2008.
- [9] S. Rakotovololona, M. Bergeron, J. Cros, P. Viarouge and M. Taghizadeh Kakhki, “Frequency-domain analysis of electrical machine dimensions and material property uncertainties by finite-element,” *COMPUMAG* 2015.

Proposta de Projeto de Pesquisa

Pós-doutorado no Canadá - CNPq / Vale / Mitacs

<u>Candidato à bolsa de Pós-doutorado:</u> Dr. Moisés Ferber de Vieira Lessa Universidade Federal de Santa Catarina Rua Dr. João Colin, 2700 - Sala E109a Joinville - SC - Brasil, CEP 89.218-035 moises.ferber@ufsc.br	<u>Orientador Canadense:</u> Prof. Dr. Jérôme Cros Pavillon Adrien-Pouliot 1065, avenue de la Médecine Local 2322B - Université Laval - Canadá Jerome.Cros@gel.ulaval.ca
---	--

Análise de Robustez de Máquinas Elétricas com Aplicações em Energia Renovável

Introdução e Motivação

Energia renovável tornou-se um dos tópicos de pesquisa mais importantes nas últimas décadas devido a várias razões, tais como o aumento da consciência pública para a proteção do ambiente, o aumento do nível de emissões CO_2 e o desejo comum de buscar recursos energéticos sustentáveis.

Algumas das mais importantes fontes de energia renováveis são: fotovoltaica, energia eólica, hídrica, biomassa, geotérmica, ondas e marés do oceano [1]. Muitas vezes, a energia proveniente de fontes renováveis deve ser primeiro convertida em eletricidade, de modo que pode depois ser usada em aplicações relacionadas com as nossas necessidades gerais. Assim, o processo de conversão de energia é fundamental em sistemas de energias renováveis e tem sido estudado há mais de um século. Em particular, a conversão de energia renovável através de máquinas elétricas desempenha um papel fundamental nos sistemas de conversão de energia renováveis atuais [2].

Hoje em dia, com o desenvolvimento dos computadores modernos, a análise e o projeto de máquinas elétricas dependem fortemente de simulações computacionais. Métodos numéricos, como o Método de Elementos Finitos (FEM, em inglês), podem calcular com precisão campos eletromagnéticos dentro de uma máquina elétrica qualquer. Esta técnica é muitas vezes chamada de prototipagem virtual, uma vez que evitam que os engenheiros construam protótipos físicos cada vez que quiserem avaliar um novo projeto de máquina. Desta maneira, a análise e concepção de máquinas elétricas pode ser realizada mais rapidamente e a um custo significativamente mais baixo [3].

Mesmo que as ferramentas numéricas existentes podem determinar de forma eficaz campos eletromagnéticos de um projeto de máquina elétrica arbitrária - prevendo assim o seu comportamento - na realidade, quando várias máquinas são fabricadas e colocadas em uso em sistemas de conversão de energias renováveis, elas estão sujeitas a incertezas [4]. As incertezas podem estar presentes devido a várias razões, tais como a dispersão de produção no processo de fabricação, o envelhecimento, a variação da temperatura ambiente e a demanda de carga desconhecida. Estas variações nas condições de fabricação e operação podem reduzir o desempenho do sistema e até mesmo causar falha. Assim, é de suma importância minimizar o impacto das incertezas em máquinas elétricas. Máquinas imunes à incertezas podem ser chamadas de máquinas elétricas robustas.

A fim de conseguir um projeto robusto, é crucial desenvolver métodos de análise de robustez eficientes para máquinas elétricas. Este problema pode ser abordado de forma determinística ou estocástica. Uma discussão mais detalhada sobre estas duas abordagens distintas de quantificação de incertezas pode ser encontrada em [5]. Na próxima seção, o problema proposto neste projeto será apresentado.

Problema Proposto

Neste projeto, vamos considerar o problema da análise de robustez de máquinas elétricas, tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência. Este problema pode ser descrito da seguinte maneira. Dado um projeto de máquina elétrica arbitrária com N parâmetros incertos e uma descrição da incerteza, determine o efeito destas incertezas sobre as M variáveis de interesse.

O projeto de uma máquina elétrica é descrito pelo tipo de máquina a ser considerado, por exemplo uma máquina assíncrona AC ou uma máquina CC sem escovas, as propriedades geométricas e as características do material ferromagnético. O valor dessas propriedades pode estar sujeito a incertezas e, portanto, pertencem ao espaço N dimensional dos parâmetros incertos. A descrição da incerteza pode ser dada, para cada parâmetro incerto, como a média e o desvio padrão, uma função de densidade de probabilidade ou um intervalo com os valores mínimo e máximo. Finalmente, as M variáveis de interesse são as quantidades que são relevantes para o projeto da máquina elétrica, tais como o torque, a eficiência ou as emissões conduzidas geradas pela máquina.

Objetivos

O principal objetivo deste projeto é desenvolver métodos para resolver o problema proposto e que têm as seguintes propriedades: baixa complexidade computacional e alta precisão. Estes objetivos são, obviamente, conflitantes. No entanto, o estado da arte em quantificação de incertezas oferece alguns métodos muito interessantes para resolver o problema proposto. Estes métodos ainda não foram aplicados extensivamente em análise e projeto de máquinas elétricas. Alguns exemplos destes métodos podem ser encontrados em [5,6,7].

Metodologia

A metodologia deste projeto será baseada em dois métodos de quantificação de incertezas que já foram desenvolvidos, mas não foram adaptados e aplicados extensivamente em máquinas elétricas: a *Unscented Transform* (UT) [8] e um método baseado em Otimização Convexa [5]. O primeiro método é adequado para a abordagem estocástica de quantificação de incertezas enquanto o segundo é apropriado para a abordagem determinística.

O primeiro método é uma abordagem não-intrusiva de análise de incertezas, como pode ser visto na Figura 1. Este método pode ser combinado com um software de método de elementos finitos para calcular os momentos estocásticos das variáveis de interesse. O candidato à bolsa de pós-doutorado tem experiência com este método aplicado a problemas de compatibilidade eletromagnética.

A especialidade do orientador canadense está relacionada principalmente à análise e projeto de máquinas e acionamentos, com alguns trabalhos na área de análise de incertezas já publicados [9]. Assim, propomos combinar a nossa experiência para aplicar este primeiro método de quantificação da incerteza em máquinas elétricas para aplicações de energia renovável.

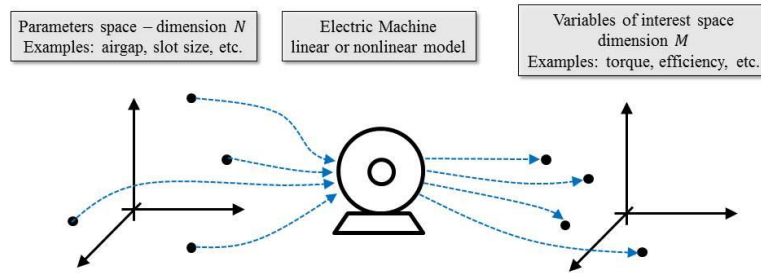


Figura 1 - Diagrama geral da “Unscented Transform” aplicada a máquinas elétricas para o problema de quantificação de incertezas

O segundo método é uma abordagem intrusiva e seus fundamentos teóricos são baseados na Teoria de Controle Robusto e Otimização Convexa. Um diagrama geral deste método é apresentado na Figura 2. Neste método, a máquina elétrica é modelada através da sua *Linear Fractional Transformation* (LFT). A LFT é apresentada no diagrama mostrado na Figura 2, em que M é a parte nominal da máquina e Δ é o bloco de incertezas. O problema de se avaliar a robustez da máquina é visto como um problema de otimização convexa. Atualmente, existem ferramentas poderosas para resolver este problema, mesmo quando centenas de parâmetros incertos são considerados [5].

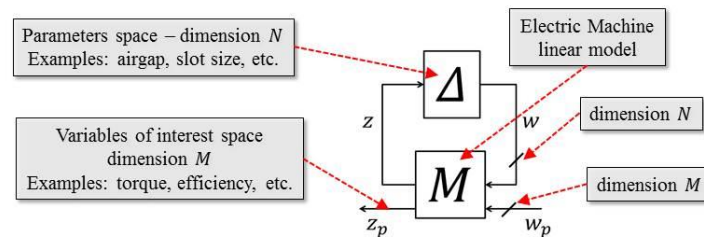


Figura 2 - Diagrama geral da análise de robustez de máquinas elétricas através da teoria de controle robusto

Como estratégia de validação, pretendemos utilizar o método de Monte Carlo para a quantificação de incertezas. Mesmo que esse método requer tipicamente milhares de simulações de uma máquina elétrica a fim de calcular as médias, desvios-padrão, funções de densidade de probabilidade e etc, os seus resultados são muito próximos dos resultados corretos.

Parte Experimental

Nós pretendemos confrontar a metodologia proposta com experimentos no Laboratório de Elétrica e Eletrônica de Potência (LEEPCI, em inglês), na Université Laval, onde o orientador canadense exerce suas principais atividades de pesquisa. A infraestrutura de pesquisa do LEEPCI, no Canadá, vai melhorar significativamente a qualidade do trabalho proposto. Na Figura 3, mostra-se alguns dos bancos de ensaio a serem utilizados no nosso projeto.

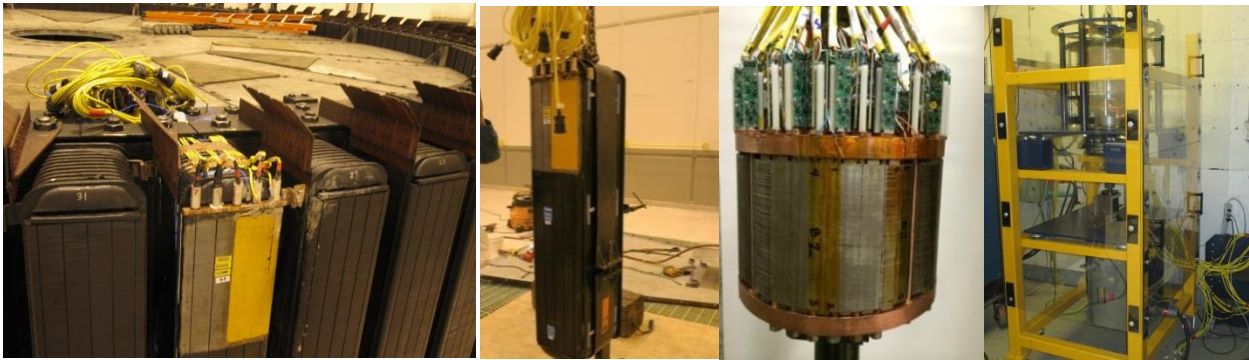


Figura 3 - Máquinas Elétricas no Laboratório de Elétrica e Eletrônica de Potência

Resultados Esperados

Os resultados gerais esperados deste projeto são o desenvolvimento e a validação de métodos de quantificação de incertezas eficientes, que são apropriados para a análise de robustez de máquinas elétricas. Estes métodos irão ajudar os engenheiros a projetar melhores e mais confiáveis sistemas de conversão de energia renovável.

Os resultados específicos deste projecto são listados abaixo:

1. implementar e validar a *Unscented Transform* para a quantificação de incertezas de máquinas eléctricas com incertezas paramétricas;
2. realizar simulações através do software MATLAB e FEM de um projeto de máquina eléctrica arbitrária;
3. implementar e validar a modelagem LFT de máquinas eléctricas;
4. realizar execuções de otimização convexa para a quantificação de incertezas de máquinas eléctricas;
5. publicar artigos nas melhores revistas científicas da área, apresentando os métodos desenvolvidos e os resultados numéricos.

Cronograma

O cronograma do projeto é apresentado na tabela abaixo. Em vermelho e azul são mostradas as actividades relacionadas com o primeiro e segundo métodos de quantificação de incertezas, respectivamente.

Atividade / Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Implementação da <i>Unscented Transform</i> em MATLAB	x	x	x									
Modelagem de uma máquina eléctrica arbitrária através do método de elementos finitos			x	x								
Desenvolvimento da ponte entre MATLAB e FEM				x	x							
Simulações Monte Carlo e UT					x							
Análise de resultados do método 1					x	x						

Implementação de máquinas elétricas incertas equivalentes, como em [5] para componentes elétricos incertos								X	X	X	X		
Otimização Convexa e simulações de Monte Carlo											X		
Análise de resultados do método 2											X	X	
Publicação de dois artigos em revista, um para cada método												X	X

Referências

- [1] M. H. Nehrir et al., “A Review of Hybrid Renewable/Alternative Energy Systems for Electric Power Generation: Configurations, Control, and Applications,” in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 392-403, Oct. 2011.
- [2] Bent Sørensen, “Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage,” Academic Press, Burlington, 2007.
- [3] J. P. A. Bastos, N. Sadowski, “Magnetic Materials and 3D Finite Element Modeling”, New York, USA CRC Press (Taylor & Francis Group) - 295pp, ISBN 978-1-4665-9251-3 , 2013.
- [4] P. Offermann, H. Mac, T. T. Nguyen, S. Clénet, H. De Gersem and K. Hameyer, “Uncertainty Quantification and Sensitivity Analysis in Electrical Machines With Stochastically Varying Machine Parameters,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 3, pp. 1-4, March 2015.
- [5] M. Ferber, A. Korniienko, G. Scorletti, C. Vollaie, F. Morel and L. Krähenbühl, “Systematic LFT Derivation of Uncertain Electrical Circuits for the Worst-Case Tolerance Analysis,” in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 5, pp. 937-946, Oct. 2015.
- [6] M. Ferber, C. Vollaie, L. Krähenbühl, J. L. Coulomb and J. A. Vasconcelos, “Conducted EMI of DC–DC Converters With Parametric Uncertainties,” in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 4, pp. 699-706, Aug. 2013.
- [7] Ferber, M.; Vollaie, C. ; Krähenbühl, L. ; Vasconcelos, J. A. . “Adaptive Unscented Transform for Uncertainty Quantification in EMC Large-Scale Systems,” *Compel (Bradford)*, v. 33, p. 1, 2014.
- [8] L. R. A. X. de Menezes, A. Ajayi, C. Christopoulos, P. Sewell and G. A. Borges, “Efficient computation of stochastic electromagnetic problems using unscented transforms,” in *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 88-95, March 2008.
- [9] S. Rakotovololona, M. Bergeron, J. Cros, P. Viarouge and M. Taghizadeh Kakhki, “Frequency-domain analysis of electrical machine dimensions and material property uncertainties by finite-element,” *COMPUMAG* 2015.