PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

**Guilherme Rodrigues Sampaio de Paula**

# Dynamics and control of stick-slip and torsional vibrations of flexible shaft driven systems applied to drillstrings

**Tese de Doutorado**

Thesis presented to the Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica of the Departamento de Engenharia Mecânica of PUC-Rio in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doutor em Engenharia Mecânica.

Advisor: Prof. Hans Ingo Weber

Rio de Janeiro
July 2017

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

**Guilherme Rodrigues Sampaio de Paula**

# Dynamics and control of stick-slip and torsional vibrations of flexible shaft driven systems applied to drillstrings

Thesis presented to the Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica of PUC-Rio in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doutor em Engenharia Mecânica. Approved by the undersigned Examination Committee.

**Prof. Hans Ingo Weber**
Advisor
Departamento de Engenharia Mecânica— PUC–Rio

**Prof. Marco Antonio Meggiolaro**
Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

**Prof. Roberta de Queiroz Lima**
Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

**Prof. Romulo Reis Aguiar**
Schlumberger

**Prof. Thiago Gamboa Ritto**
Universidade Federal do Rio de Janeiro — UFRJ

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**
Coordinator of the Centro Técnico Científico da PUC–Rio

Rio de Janeiro, July 20th, 2017

**Guilherme Rodrigues Sampaio de Paula**

Guilherme Rodrigues graduated as control and automation engineer in 2010 from PUC-Rio (Rio de Janeiro, RJ), and got his master degree in mechanical engineering in 2012 from the same institution.



Bibliographic data

de Paula, Guilherme Rodrigues Sampaio

Dynamics and control of stick-slip and torsional vibrations of flexible shaft driven systems applied to drillstrings / Guilherme Rodrigues Sampaio de Paula; advisor: Hans Ingo Weber, 2017.

96 f. : il.; 30 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Sistema embarcado. 3. Vibrações torcionais. 4. Controle adaptativo. 5. Perfuração. 6. Dinâmica não linear. I. Weber, Hans Ingo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

# Acknowledgments



First I would like to thank my family, for all the support given.

To my advisor, professor Hans I. Weber, for the tutoring on this research and for providing the conditions for achieving the results presented

To the technician Wagner Epifanio for manufacturing several mechanical parts essential for the experimental setup

To professor Naira Hovakimyan and the Ph.D. candidates Thiago Marinho and Hamidreza Jafarnejadsani of the Intelligent robotics lab of the University of Illinois at Urbana-Champaign for the collaboration on the implementation of $L_1$ adaptive control

To CAPES for the scholarship and financial support to the research

# Abstract

de Paula, Guilherme Rodrigues Sampaio; Weber, Hans Ingo. **Dynamics and control of stick-slip and torsional vibrations of flexible shaft driven systems applied to drillstrings**. Rio de Janeiro, 2017. 96p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Systems actuated through a highly flexible shaft pose a big challenge to control strategies as the actuator is not connected directly to the end effector, causing propagation effects as well as an energy accumulation and dissipation in the shaft. This thesis focuses the study of one of the most investigated applications of this type, the top driven drilling system used in the oil and gas industry. Usually, the drilling system is composed of a top drive linked to the drill bit through hundreds or even thousands of meters of steel pipes. All kinds of vibrations will be found: longitudinal deformations will be associated with the bit bouncing, flexional with rubbing, and torsional with stick-slip effects. A better understanding is only possible when each of these situations is carefully investigated. This thesis focuses on the torsional deformation of the highly flexible string and presents two different models for the the drill string, the first is the most common 1 DOF single spring single damper model. The second one is a 20 DOF lumped parameter model that has the advantage of being able to consider the mass of the drill string and propagation of torsional waves in the shaft. The investigation includes the development of a test rig adequate for torsional vibrations under damping that may induce stick-slip in the system. Two control techniques are studied to reduce the torsional vibrations in drill strings with numerical and experimental results presented. The first is a behavior-based open loop control scheme that is very simple and effective to reduce stick-slip oscillations. The second one is the $L_1$ adaptive control, which uses a reference model on its structure.

## Keywords

Stick-slip; Embedded system; Torsional vibrations; Adaptive control; Drilling; Nonlinear dynamics.

# Resumo

de Paula, Guilherme Rodrigues Sampaio; Weber, Hans Ingo. **Dinâmica e controle de stick-slip e vibrações torcionais em sistemas acionados por eixos flexíveis aplicados a colunas de perfuração**. Rio de Janeiro, 2017. 96p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Sistemas rotativos atuados através de um eixo flexível apresentam um grande desafio para estratégias de controle, uma vez que o atuador não está conectado diretamente ao sistema principal, causando efeitos de propagação de ondas e acúmulos e dissipações de energia no eixo. Este trabalho apresenta um estudo sobre uma das mais notórias aplicações deste problema, sistemas de perfuração de petróleo. Habitualmente, o sistema de perfuração é composto por um motor de topo conectado à broca através de milhares de metros de tubos de aço que transmitem o torque. Diversos tipos de vibrações podem ser observadas: Axiais, de flexão e torcionais, estas últimas ligadas ao fenômeno stick-slip. Para um completo conhecimento do problema, é necessário conhecer cada uma delas. Esta tese trata especificamente das vibrações torcionais através de uma análise com dois diferentes modelos, um primeiro mais simples de dois graus de liberdade (inércia, mola torcional, amortecedor), e um segundo mais completo discretizado em 20 graus de liberdade capaz de considerar a massa do eixo e efeitos de propagação de ondas mecânicas no eixo. Este trabalho inclui ainda a construção de uma bancada em escala reduzida para observar os fenômenos associados às vibrações torcionais. São apresentados ainda estudos numéricos e experimentais de técnicas de controle para minimizar os efeitos do atrito na dinâmica torcional do sistema. Duas estruturas de controle são estudadas nesta tese a fim de reduzir vibrações torcionais em colunas de perfuração. A primeira é um controle simples, de malha aberta, baseado no comportamento do sistema. A segunda é o controle adaptativo $L_1$, que faz uso de um modelo de referência do sistema em sua estrutura.



## Palavras-chave

Stick-slip; Sistema embarcado; Vibrações torcionais; Controle adaptativo; Perfuração; Dinâmica não linear.

# Contents

# List of Figures

# List of Tables