



**Fernando Hey**

**Estratégias de Controle Aplicadas ao Problema de  
Dirigibilidade de Veículos Terrestres em Trajetórias  
Fechadas Pré-Definidas**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientadores: Marco Antonio Meggiolaro  
Mauro Speranza Neto

Rio de Janeiro  
Março de 2008



**Fernando Hey**

**Estratégias de Controle Aplicadas ao Problema de  
Dirigibilidade de Veículos Terrestres em Trajetórias  
Fechadas Pré-Definidas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Marco Antonio Meggiolaro**  
Orientador  
DEM/PUC-Rio

**Mauro Speranza Neto**  
Co-Orientador  
DEM/PUC-Rio

**Fernando Ribeiro da Silva**  
DEM/IME

**Ricardo Tanscheit**  
DEE/PUC-Rio

**Alexandre de Lima Spinola**  
PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de março de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Fernando Hey**

Engenheiro de Controle e Automação formado pela PUC-Rio em 2005, ingressou para o mestrado, no departamento de engenharia mecânica da própria PUC em 2005. Durante a graduação estagiou na área de engenharia, no desenvolvimento de sistemas integrados de gestão envolvendo softwares de análise estrutural e estabilidade para a indústria offshore. Depois de formado trabalha no ramo offshore, na área de operações e instalações submarinas.

#### Ficha Catalográfica

Hey, Fernando

Estratégias de controle aplicadas ao problema de dirigibilidade de veículos terrestres em trajetórias fechadas pré-definidas / Fernando Hey ; orientadores: Marco Antonio Meggiolaro, Mauro Speranza Neto. – 2008.

99 f. : il.(color.) ; 29,7 cm

1. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Dinâmica veicular. 3. Controle de sistemas automotivos. 4. Aplicações de controle clássico e moderno. 5. Controle ótimo. 6. Controle de trajetórias fechadas. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Speranza Neto, Mauro. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Aos meus familiares e em especial à minha namorada Carolina.

## Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Mauro Speranza pelo estímulo e orientação na realização desse trabalho.

À minha namorada Carolina Caldas pelo grande incentivo e companheirismo nos momentos decisivos do trabalho.

Aos meus amigos Mauro Lawall e Pedro Drummond pela ajuda e pelos momentos de descontração.

Aos meus pais pela educação e conselhos valiosos.

À CAPES pelo incentivo e credibilidade depositada neste trabalho.

## Resumo

Hey, Fernando; Speranza Neto, Mauro. **Estratégias de Controle Aplicadas ao Problema de Dirigibilidade de Veículos Terrestres em Trajetórias Fechadas Pré-Definidas**. Rio de Janeiro, 2008. 99p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Apresenta-se o uso das ferramentas lineares de Controle Clássico (Lugar Geométrico das Raízes) e Moderno (Realimentação de Estado e de Saída e Alocação de Pólos) para estabelecer os ajustes dos controladores adotados no problema de acompanhamento de trajetórias em traçados fechados por veículos terrestres, procurando reproduzir o comportamento do ser humano no comando deste tipo de sistema. Os modelos adotados para o veículo são lineares (funções de transferência e matrizes de estado e de entrada), porém a caracterização da trajetória fechada é geometricamente não-linear. Verifica-se deste modo como o projeto de um controle linear satisfaz as condições não lineares associadas. Os conceitos e ferramentas conhecidos são aplicados em diversos tipos de traçados, para diferentes condições do veículo – velocidade, limites de esterçamento, etc – e, a partir das simulações realizadas, são analisadas as características de comportamento do veículo – acelerações, estabilidade, etc - e comparadas as previsões dos projetos lineares com os resultados encontrados. É feita ainda uma breve introdução ao emprego do Controle Ótimo no problema de acompanhamento de traçados, utilizando um modelo bastante simplificado do veículo, e verificando as condições necessárias para se estabelecer a trajetória ótima em um traçado aberto, dado como critério o tempo mínimo para percorrê-lo.

## Palavras-chave

Dinâmica Veicular; Controle de Sistemas Automotivos; Aplicações de Controle Clássico e Moderno; Controle Ótimo; Controle em Trajetórias Fechadas.

## Abstract

Hey, Fernando; Speranza Neto, Mauro (Advisor). **Control Strategies Applied to Ground Vehicles Handling Problem in Pre-Defined Closed Trajectories**. Rio de Janeiro, 2007. 99p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of classic and modern linear control tools (root locus and output regulation) is presented to determine the parameters of controllers used to follow a pre-defined closed path, in a way to approach the vehicle behavior and human actions when driving a car. The car is represented by linear models (transfer functions, state-space matrix), but the relation between the car and the closed path is non linear. It is verified how the project of a linear controller deals with the non linear characteristics of the closed loop. The concepts and tools of linear control are applied to some kinds of paths in different vehicle conditions (speed, steering angle limits, etc), and the results of simulations show the characteristics of the car, like accelerations, stability and position on the track. It's also presented a little introduction to the problem of determine an optimal trajectory to run a corner, given the initial and final velocities and initial and final positions. In this case a very simple model is considered and the solution is based on open paths analysis.

## Keywords

Vehicular dynamics; Control of automotive systems; Applications of classic and modern control; Optimal control; Closed path control.

## Sumário

1. Introdução	10
1.1. Motivação	12
1.2. Objetivo Geral	13
1.3. Objetivos Específicos	14
1.4. Revisão Bibliográfica	15
1.5. Estrutura da Dissertação	15
2. Malha de Controle	18
2.1. Construção da Pista	19
2.2. Implementação da Malha de Controle	24
2.3. Geração do Sinal de Erro	26
3. Modelo Cinemático do Veículo	29
3.1. Construção da Malha de Controle	32
3.2. Simulações	33
4. Modelo Linear de Quatro Graus de Liberdade	39
4.1. Malha de Controle com Transferência de Referencial Linear	40
4.1.1. Função de Transferência do Modelo	41
4.1.2. Construção da Malha	43
4.1.3. Simulações Para um Controlador Proporcional	46
4.1.4. Controlador Proporcional Derivativo Duplo	49
4.2. Transferência de Referencial Não Linear	54
5. Realimentação do Ângulo de Yaw	60
5.1. Simulações	61

6. Controlador de Estado	69
6.1. Cálculo da Matriz de Ganho (K)	70
6.2. Simulações Para o Controlador de Estado	73
7. Definição da Trajetória via Controle Ótimo	80
7.1. Descrição do Problema de Tempo Mínimo	81
7.1.1. Condições Iniciais e Finais de Velocidade Livres	81
7.1.2. Condições Iniciais e Finais de Velocidade Definidas	88
7.2. Tratar um Problema Real	94
8. Conclusões	96
9. Referencias Bibliográficas	98