



**Juan Gerardo Castillo Alva**

**Controle por Aprendizado de Sistemas Servo – Hidráulicos  
de Alta Frequência**

**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.

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro

Abril de 2008



**Juan Gerardo Castillo Alva**

## **Controle por Aprendizado de Sistemas Servo – Hidráulicos de Alta Freqüência**

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.

**Prof. Marco Antonio Meggiolaro**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio

**Prof. Timothy Hamilton Topper**

University of Waterloo

**Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Mauro Speranza Neto**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Abril de 2008

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

## Juan Gerardo Castillo Alva

Graduou-se em Engenharia Eletrônica Universidad Privada Antenor Orrego Trujillo - Perú em 2000.

### Ficha Catalográfica

Castillo Alva, Juan Gerardo.

Controle por aprendizado de sistemas servo-hidráulicos de alta frequência / Juan Gerardo Castillo Alva; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – 2008.

94 f.: il.; 30 cm

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

Incluí bibliografia.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Sistema servo - hidráulicos. 3. Controle por aprendizado. 4. Sistemas de alta frequência. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Ao Senhor Jesus Cristo, meu pai Juan Julio, minha mãe Esther, meus irmãos Gastón, Augusto, minha irmã Sara, meu cunhado Jose Luis e meus queridos amigos.

## Agradecimentos

Ao Professor Marco Antonio Meggiolaro pela paciência e orientação durante o desenvolvimento do curso de mestrado.

Agradecemos ao Professor Timothy Hamilton Topper por toda a valiosa contribuição na concepção do controle proposto.

Ao Professor Jaime Tupiassú Pinho de Castro pelas sábias sugestões.

Ao meu grande amigo Jaime de castro Neto, pela ajuda na parte experimental em todo momento.

Ao meu amigo Pedro Blois que me auxiliou cada vez que foi requerido na parte da programação do LabVIEW.

A Mayra Amanda, Marco Perez, Jesus Leal, Habib Zambrano, Jorge e Gilmar amigos e colegas de laboratório.

Aos meus amigos David Achanccaray, Nilton Anchayhua e Rocem Jimenez

Aos professores da PUC-Rio pelo ensino.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e seus funcionários, pela colaboração comigo.

A CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior pela ajuda financeira.

A todas aquelas pessoas que de alguma outra forma participaram no desenvolvimento da dissertação.

## Resumo

Castillo Alva, Juan Gerardo; Meggiolaro, Marco Antonio. **Controle por Aprendizado de Sistemas Servo – Hidráulicos de Alta Freqüência**. Rio de Janeiro, 2008. 94p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Sistemas hidráulicos são usados onde se requerem forças e torques relativamente altos, alta velocidade de resposta para o início, parada e reversão da velocidade. Eles são usados em sistemas industriais, em robótica, simuladores de movimento, plantas automatizadas, exploração de minérios, prensas, e especialmente em sistemas de testes de fadiga de materiais. As máquinas de testes de fadiga baseadas em sistemas servo-hidráulicos têm como propósito fazer ensaios nos materiais para prever a vida útil em serviço. Os ensaios de fadiga são quase sempre independentes da freqüência de trabalho. Para uma dada resistência do material e magnitudes das tensões alternadas e médias aplicadas, a vida à fadiga depende essencialmente do número de ciclos de carga aplicados ao material testado. Por esse motivo, trabalhar com a máquina de ensaios de materiais a uma freqüência elevada traz vantagens de redução de tempo e custo dos ensaios, sem interferir nos resultados. A aplicação da carga pode ser repetida milhões de vezes, em freqüências típicas de até cem vezes por segundo para metais. Para se atingirem estas freqüências, relativamente altas para um teste de fadiga, é necessário um sistema de controle eficiente. Nesta dissertação, técnicas de controle por aprendizado são desenvolvidas e aplicadas a uma máquina de ensaios de materiais, permitindo a aplicação de carregamentos de amplitude variável em alta freqüência. A metodologia proposta consiste em fazer um controle do tipo *bang-bang*, restringindo à servo-válvula do sistema a trabalhar sempre nos seus limites extremos de operação, i.e., procurando mantê-la sempre completamente aberta em uma ou outra direção. Devido à dinâmica do sistema, os pontos de reversão devem ficar antes dos picos e vales de força ou tensão desejada. O instante de reversão é um parâmetro que depende de diversos fatores, como a amplitude e carga média da solicitação, e também é influenciado por zonas mortas causadas, e.g., por folgas na fixação dos corpos de prova. Para que a servo-válvula trabalhe no limite de seu funcionamento, o algoritmo de aprendizado obtém os instantes ótimos para as reversões, associados a variáveis adimensionais com

valores entre 0 e 1, armazenados em tabelas específicas para cada tipo de carregamento. A lei de aprendizado preenche e atualiza constantemente os valores das tabelas durante a execução dos testes, melhorando a resposta do sistema a cada evento. Apresentam-se a modelagem dinâmica de uma máquina servo-hidráulica e de sua malha de controle, e simulações comparando o controle PID com o controle por aprendizado proposto. A validação experimental é feita em uma máquina servo-hidráulica de ensaios de fadiga. Para este fim, um *software* de controle em tempo real foi especialmente desenvolvido e implementado em um sistema computacional CompactRIO. Os resultados demonstram a eficiência da metodologia proposta.

### **Palavras-chave**

Controle por Aprendizado, Sistemas Servo-Hidráulicos, Sistemas de Controle, Sistemas Servo-Hidráulicos de Alta Frequência, Servo-válvulas.

## Abstract

Castillo Alva, Juan Gerardo; Meggiolaro, Marco Antonio. **Learning Control of High Frequency Servo-Hydraulic Systems**. Rio de Janeiro, 2008. 94p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.

Hydraulic systems are used where relatively high forces and torques are required, or when high response speeds are necessary. They are used in industrial systems, robotics, movement simulators, automated plants, ore exploration, presses, and especially in fatigue testing systems. Fatigue tests are usually performed on servo-hydraulic systems, in order to predict the behavior of materials and their life in service. Fatigue tests are almost always independent of the loading frequency. For a given material and magnitudes of alternate and mean stresses, the fatigue life depends essentially on the number of applied load cycles on the tested material. For this reason, working with the material testing machine at high frequencies brings the advantages of reduction in time and cost, without altering the results. The application of the load can be repeated millions of times, in frequencies of up to one hundred times per second for metals, or even more. To achieve such frequencies, relatively high for a fatigue test, it is necessary to use an efficient control system. In this thesis, learning control techniques are developed and applied to a materials testing machine, allowing the application of constant or variable amplitude loads in high frequency. The proposed methodology consists of implementing a bang-bang type control, restricting the system servo-valve to always work at its extreme limits of operation, i.e., always keeping it completely open in one or the other direction. Due to the system dynamics, the reversion instant must happen before achieving the peaks and valleys of desired force (or stress, strain, etc.). The reversion instant is a parameter that depends on several factors, such as the alternate and mean loading components. It is also influenced by dead zones caused, e.g., by the slack in the mounting between a CTS specimen and the machine pins. As the servo-valve works in its limits of operation, the learning algorithm tries to obtain the optimal instants for the reversions, associating them to a non dimensional variable with values between 0 and 1, stored in specific tables. The learning law constantly updates the values of the table during the execution of the tests, improving the system response. In this



work, the dynamic modeling of a servo-hydraulic machine is presented, together with its control scheme. Simulations are performed to compare results from PID and learning controls. The experimental validation is made using a servo-hydraulic testing machine. For this purpose, real time control software is developed and implemented in a CompactRIO computational system. The results demonstrate the efficiency of the proposed methodology.

### **Key-words**

Learning Control, Servo-Hydraulic Systems, Control Systems, High Frequency, Materials Testing, Servo-Valves.

# Sumário

1	Introdução	14
1.1.	Objetivo	14
1.2.	Considerações Iniciais	14
1.3.	Motivação	15
1.4.	Revisão Bibliográfica	17
1.5.	Roteiro da Dissertação	19
2	Fundamentos Teóricos	20
2.1.	Propriedades Físicas dos Fluidos	20
2.2.	Tipos de Fluxo	21
2.2.1.	Fluxo em mangueiras	22
2.2.2.	Fluxo em orifícios	23
2.2.3.	Fluxo em válvulas	24
3	Descrição Geral de Sistemas Servo–Hidráulicos	26
3.1.	Estrutura básica de sistemas servo–hidráulicos	26
3.2.	Descrição dos componentes	27
3.2.1.	Válvula Hidráulica	27
3.2.2.	Bombas e Atuadores	31
3.3.	Sensores / Transdutores	33
3.3.1.	LVDT ( <i>Linear Variable Differential Transformer</i> )	33
3.3.2.	Células de carga	35
3.3.3.	Clip Gage	37
4	Modelagem do Sistema	39
4.1.	Modelos Elementares	39
4.1.1.	Modelagem da Servo-válvula	39
4.1.2.	Fonte de Energia Hidráulica	51
4.1.3.	Mangueiras	51
4.1.4.	Cilindro hidráulico	52
4.2.	Modelos Lineares	56
4.2.1.	Controle de Posição	56

4.2.2. Controle de Força	57
4.2.3. Controle de Deformação	58
5 Controle e Simulação	59
5.1. Controle PID	59
5.1.1. Sintonização para Controladores PID	59
5.1.2. Resposta do controlador PID para o controle de força	60
5.1.3. Resposta do controlador PID para o controle de posição	62
5.1.4. Resposta a uma entrada degrau máxima	63
5.2. Controle por Aprendizado	64
5.2.1. Tabela de Aprendizado	66
5.2.2. Leitura do valor de $U_{ij}$	68
5.2.3. Lei de aprendizado	69
5.2.4. Algoritmo de Controle	71
5.2.5. Resultado das simulações do controle por aprendizado	73
6 Sistema Experimental e Resultados	77
6.1. Sistema Experimental	77
6.1.1. CompactRIO	78
6.1.2. Módulos de Entrada e Saída	80
6.2. Calibragem dos Transdutores	84
6.2.1. Calibragem da célula de carga	84
6.2.2. Calibragem do clip gage	85
6.3. Software desenvolvido em LabVIEW	85
6.4. Resultados Experimentais	85
7 Conclusões	88
Bibliografia	89
Apêndice	91
Conversor Voltagem – Corrente desenvolvido:	91
Programas feitos no LabVIEW para o controle por aprendizado	92

## Lista de figuras

Figura 1.1. Ensaio de Fadiga.	16
Figura 1.2. Etapas do sistema de controle das Máquinas de Ensaio do Laboratório de Fadiga da PUC-Rio [4].	18
Figura 2.1. Definição de Tensão Cisalhante.	20
Figura 2.2. Perfil de velocidade do fluxo laminar.	21
Figura 2.3. Perfil de velocidade do fluxo turbulento.	22
Figura 2.4. Fluxo mediante orifício a) fluxo laminar, b) fluxo turbulento.	23
Figura 3.1. Vista em corte de uma servo-válvula hidráulica.	27
Figura 3.2. Definição de tipos de centros e seus gráficos de sinais de fluxo e curvas de fluxo de escoamento correspondentes.	29
Figura 3.3. Modo de operação da servo-válvula quando é aplicado um sinal elétrico.	30
Figura 3.4. Vista em corte de um cilindro hidráulico [4].	32
Figura 3.5. Vista em corte de um LVDT.	33
Figura 3.6. Representação elétrica de um LVDT.	35
Figura 3.7. Célula de carga.	37
Figura 3.8. Princípio de um Clip Gage para medida do deslocamento.	38
Figura 4.1 Representação esquemática da servo-válvula de três estados.	40
Figura 4.2. Diagrama de Blocos da servo-válvula de realimentação mecânica [moog].	46
Figura 4.3. Resposta dinâmica para uma servo-válvula com uma aproximação de segunda ordem.	48
Figura 4.4. Fluxo gerado pela servo-válvula para uma entrada de corrente de $\pm 40$ mA.	49
Figura 4.5. Diagrama de Bode da função de transferência da servo-válvula hidráulica.	50
Figura 5.1. Diagrama de blocos para o controle de força incluindo o controlador PID.	61
Figura 5.2. Resposta do controlador PID para um carregamento	

senoidal.	61
Figura 5.3. Malha fechada para o controle de posição.	62
Figura 5.4. Resposta do controlador PID para um sinal senoidal de posição.	63
Figura 5.5. Função de transferência em malha aberta de força em relação à corrente de entrada.	63
Figura 5.6. Resposta a uma entrada degrau máxima.	64
Figura 5.7. Diagrama de blocos do controle por aprendizado.	66
Figura 5.8. Tabela de Aprendizado.	67
Figura 5.10. Algoritmo de controle por aprendizado.	72
Figura 5.11. Resposta do controle por aprendizado para uma entrada de amplitude constante.	73
Figura 5.12. Vista ampliada de um pico e do Ponto de reversão da servo-válvula.	74
Figura 5.13. Resposta do controle por aprendizado para uma entrada de amplitude variável.	74
Figura 5.14. Gráfico das respostas do sistema de controle após o aprendizado para carregamentos	75
Figura 6.1. Configuração e conexões do Sistema de Controle.	78
Figura 6.2. CRIO 9004.	79
Figura 6.3 Tarefas que podem ser desenvolvidas no FPGA.	80
Figura 6.4. NI cRIO 9263.	81
Figura 6.5. NI cRIO 9237.	82
Figura 6.6 Máquina de Ensaio INSTRON 8501.	83
Figura 6.7 Sistema Computacional (computador, CompactRio e conversor de tensão elétrica em corrente)	84
Figura 6.8 Comportamento da máquina servo-hidráulica para um ensaio de fadiga sob amplitude constante com controle por aprendizado.	86
Figura 6.9 Comparação de desempenho usando os diferentes controles.	87