

**Diego Cedrim Gomes Rêgo**

**Execução Otimizada de Transações  
Financeiras: Um Estudo Empírico**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática da PUC-Rio

Orientador: Prof. Eduardo Sany Laber

Rio de Janeiro  
Março de 2009



**Diego Cedrim Gomes Rêgo**

## **Execução Otimizada de Transações Financeiras: Um Estudo Empírico**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Eduardo Sany Laber**

Orientador

Departamento de Informática — PUC-Rio

**Prof. Edward Hermann Haeusler**

Departamento de Informática - PUC-Rio

**Prof. Alexandre Roberto Renteria**

PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 5 de Março de 2009

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

### **Diego Cedrim Gomes Rêgo**

Graduou-se em Ciências da Computação na Universidade Federal de Alagoas.

#### Ficha Catalográfica

Rêgo, Diego Cedrim Gomes

Execução otimizada de transações financeiras: um estudo empírico / Diego Cedrim Gomes Rêgo ; orientador: Eduardo Sany Laber. - 2009.

107 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Informática) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia.

1. Informática – Teses. 2. Aprendizado de Máquina. 3. Aprendizado por Reforço. 4. Mercados Financeiros. 5. Algoritmos. 6. Otimização. I. Laber, Eduardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

## Agradecimentos

A Deus, por tudo.

A minha querida família em Maceió-AL e em Recife-PE.

Ao meu orientador, Eduardo Laber.

Ao Departamento de Informática da PUC-Rio.

Aos meus amigos da PUC-Rio, que foram muito importantes e tornaram esses dois anos mais agradáveis.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Rêgo, Diego Cedrim Gomes; Laber, Eduardo. **Execução Otimizada de Transações Financeiras: Um Estudo Empírico**. Rio de Janeiro, 2009. 107p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Apresentamos um estudo empírico comparativo para o problema de Execução Otimizada de Transações nos mercados financeiros modernos. Construímos um simulador dos mercados financeiros, e então, baseado nessa ferramenta, comparamos o desempenho de algumas estratégias propostas na literatura. Os melhores resultados foram obtidos por estratégias que usam técnicas de aprendizado de máquina.

## Palavras-chave

Aprendizado de Máquina. Aprendizado por Reforço. Mercados Financeiros. Algoritmos. Otimização.

## Abstract

Rêgo, Diego Cedrim Gomes; Laber, Eduardo. **Optimized Financial Trade Execution: A empirical study**. Rio de Janeiro, 2009. 107p. MsC Dissertation — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

We present a comparative empirical study for the Optimized Trade Execution problem in moderns financial markets. We build a financial market simulator and then, based on this tool, we compare the performance of many strategies available in the literature. The best results were achieved by strategies that make use of machine learning techniques.

## Keywords

Machine Learning. Reinforcement Learning. Financial Markets. Algorithms. Optimization.

# Sumário

1	Introdução	10
1.1	Definição do Problema	10
1.2	Contribuições	10
1.3	Trabalhos Relacionados	11
1.4	Organização	14
2	Conceitos Básicos	15
2.1	Microestrutura do Mercado	15
2.2	Aprendizado por Reforço	17
2.3	Validação de Algoritmos de Aprendizado de Máquina	26
3	Algoritmos Implementados	30
3.1	Considerações Iniciais	30
3.2	Estratégia Submit and Execute	31
3.3	Estratégia Submit and Leave	31
3.4	Estratégia Reinforcement Learning	32
3.5	Estratégia Kearns	39
3.6	Estratégia Aleatória	44
3.7	Estratégia Ótima	45
4	Análise Experimental	46
4.1	Ambiente e Dados	46
4.2	Medição de Performance	49
4.3	Estratégias e Parâmetros	50
4.4	Resultados dos Experimentos	52
4.5	Observações Gerais sobre os Experimentos	52
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	65
	Referências Bibliográficas	67
A	Tabelas de Resultados dos Experimentos	70

## Lista de figuras

2.1	Modelo padrão de aprendizado por reforço	18
2.2	Labirinto	24
2.3	Política Ótima para Resolução do Labirinto	26
2.4	Método <i>holdout</i>	28
2.5	Seleção Aleatória de Subconjuntos (com $K = 8$ )	28
2.6	<i>K-Fold Cross validation</i> (com $K = 4$ )	29
2.7	<i>Leave-one-out Cross Validation</i>	29
3.1	Exemplo da Estratégia <i>Submit and Execute</i> (com $R = 5$ )	31
3.2	Estratégia <i>Submit and Leave</i> : Duas Ofertas (com $R = 5$ )	31
3.3	Estratégia <i>Submit and Leave</i> : Única Oferta (com $R = 5$ )	32
3.4	Exemplo de Flutuação do Valor de Negociação de uma Ação	34
3.5	Exemplo de Recompensa	36
3.6	Exemplo da Estratégia <i>Reinforcement Learning</i>	39
3.7	Curva de Retornos	41
3.8	Curva de Riscos	42
3.9	<i>Trade-off</i> entre risco e retorno	43
3.10	Exemplo da Estratégia Aleatória	45
4.1	Exemplo dos Dados Colhidos	48
4.2	Exemplo de Demarcação de Intervalos	49
4.3	Política Kearns ( <i>agressividade</i> = 1.0, $R = 60$ e objetivo de compra)	55
4.4	Política <i>Reinforcement Learning</i> ( $R = 60$ , objetivo de compra)	56
4.5	Retornos recebidos em função do fator (Compra)	57
4.6	Retornos recebidos em função do fator (Venda)	58



## Lista de tabelas

2.1	<i>Book</i> de Compra	16
2.2	<i>Book</i> de Venda	16
2.3	Exemplo de diálogo entre o agente e o ambiente	19
2.4	Sequência de aprendizado da política ótima	26
3.1	Atributos Privados	33
3.2	Atributos Públicos	33
3.3	Espaço de Ações do Agente	35
3.4	Exemplo de Possíveis Ações em Estados	36
3.5	Exemplo de Política de Venda	39
4.1	Lista de Experimentos Executados	53
4.2	Pontuação Geral das Estratégias	61
4.3	Pontuação das Estratégias (Venda)	63
4.4	Pontuação das Estratégias (Compra)	64
A.1	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 10$ , Compra, Dólar	71
A.2	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 30$ , Compra, Dólar	73
A.3	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 60$ , Compra, Dólar	74
A.4	Método <i>Holdout</i> , $R = 10$ , Compra, Dólar	76
A.5	Método <i>Holdout</i> , $R = 30$ , Compra, Dólar	78
A.6	Método <i>Holdout</i> , $R = 60$ , Compra, Dólar	79
A.7	Método <i>Holdout</i> , $R = 10$ , Venda, Dólar	81
A.8	Método <i>Holdout</i> , $R = 30$ , Venda, Dólar	82
A.9	Método <i>Holdout</i> , $R = 60$ , Venda, Dólar	84
A.10	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 10$ , Venda, Dólar	85
A.11	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 30$ , Venda, Dólar	87
A.12	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 60$ , Venda, Dólar	88
A.13	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 10$ , Compra, Petrobras	90
A.14	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 30$ , Compra, Petrobras	91
A.15	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 60$ , Compra, Petrobras	93
A.16	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 10$ , Venda, Petrobras	95
A.17	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 30$ , Venda, Petrobras	96
A.18	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 60$ , Venda, Petrobras	98
A.19	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 10$ , Compra, Vale	99
A.20	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 30$ , Compra, Vale	101
A.21	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 60$ , Compra, Vale	102
A.22	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 10$ , Venda, Vale	104
A.23	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 30$ , Venda, Vale	105
A.24	<i>10-Fold Cross Validation</i> , $R = 60$ , Venda, Vale	107