



**Wilson Nascimento de Freitas**

**Sobre o Comportamento Endógeno do  
Mercado de Ações: Simulações e Experimentos**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Rosane Riera Freire

Rio de Janeiro  
Agosto de 2006



**Wilson Nascimento de Freitas**

**Sobre o Comportamento Endógeno do  
Mercado de Ações: Simulações e Experimentos**

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

**Prof. Rosane Riera Freire**

Orientador

Departamento de Física — PUC-Rio

**Prof. Thadeu Josino Pereira Penna**

Instituto de Física — Universidade Federal Fluminense

**Prof. Welles Martinez Morgado**

Departamento de Física — PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de Agosto de 2006

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

### **Wilson Nascimento de Freitas**

Graduou-se em Física na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

#### Ficha Catalográfica

Freitas, Wilson

Sobre o Comportamento Endógeno do Mercado de Ações: Simulações e Experimentos / Wilson Nascimento de Freitas; orientador: Rosane Riera Freire. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Física, 2006.

v., 108 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física.

Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Tese. 2. Econofísica. 3. Mercado de Ações. 4. Microsimulação. 5. Análise Técnica. I. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. II. Título.

CDD: 510

A minha amada esposa Lissandra, companheira brava.

## Agradecimentos

Agradeço:

À todas as pessoas maravilhosas que pelos mais variados motivos cruzaram o meu caminho.

À minha esposa, Lissandra Andion, pelo grande amor, pelo apoio constante, e principalmente, por ter acreditado em mim.

Aos meus filhos, Pedro e Bruno, fontes de constante alegria e motivação.

Aos meus pais, Turiassú e Vandira, por terem me mostrado de forma tão veemente o poder transformador da educação.

Aos meus sogros, Rosana e Coralino, por terem me acolhido com tanto afeto.

Ao meu irmão, Rodrigo Freitas, pela grande amizade.

Ao meu grande amigo, Marcus Moldes, pela sua presença sempre inspiradora, seus conselhos precisos e por me fazer enxergar o mundo de uma forma mais realista.

Aos amigos da pós-graduação, Eduardo Thiesen, Edson Vernek, Laércio Costa, Anderson Cortines, Lucas Sigaud e Renato *Lélé* Barbosa, pelo apoio mútuo e pela diversão.

Aos amigos do Laboratório ICA, Omar Paranaíba, Dilza Szwarcman, Karla Figueiredo, Abílio de Assis, Eugênio Silva, João Ribeiro (Sem ímpeto), Juan Lazo Lazo, Yvan Tupac e todos os outros, pela amizade e diversão.

À Giza, secretária da pós-graduação do departamento de Física da PUC-Rio, que sempre me ajudou livrando-me da burocracia.

À minha orientadora, Rosane Freira, por toda a dedicação a mim nesses dois anos de mestrado, sempre me dando liberdade para tentar novos caminhos e me incentivando com longas discursões. Todo esse processo contribuiu firmemente para o meu amadurecimento pessoal e científico. Pelas longas reuniões, longas mesmo, durante a elaboração desse trabalho e por todos os conselhos que sem dúvida foram fundamentais para que o conteúdo dessa obra seja mais facilmente digerido.

À FAPERJ, CAPES e CNPq pelo suporte financeiro.

## Resumo

Freitas, Wilson; . **Sobre o Comportamento Endógeno do Mercado de Ações: Simulações e Experimentos**. Rio de Janeiro, 2006. 108p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Desenvolvemos um modelo de mercado de ações baseado em agentes e o simulamos numericamente. Os agentes são heterogêneos, possuem aversão ao risco e adotam estratégias de negociação provenientes da análise técnica. As flutuações são governadas por uma componente estocástica no investimento dos agentes.

O modelo reproduz os fatos estilizados observados empiricamente nos mercados de ações no regime normal, tais como distribuição de retornos com caudas longas, memória de curto-alcance na série temporal de retornos e correlação de longo-alcance na volatilidade.

Nossas simulações mostram que estes fenômenos empíricos emergem endogenamente do comportamento coletivo dos agentes, apesar da simplicidade do modelo. Isto sugere que a dinâmica complexa do mercado não surge da complexidade do comportamento individual dos investidores, mas sim da interação entre eles através da formação do preço de mercado.

## Palavras-chave

Econofísica. Mercado de Ações. Microsimulação. Análise Técnica.

## Abstract

Freitas, Wilson; . **On the Endogenous Behaviour of the Stock Market: Simulation and Experiments**. Rio de Janeiro, 2006. 108p. MsC Thesis — Department of Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

We develop a multi-agent based model of stock market and simulate it numerically. The agents are heterogeneous and risk-averse, adopting trading strategies deriving from technical analysis. The fluctuations are driven by a stochastic component in agent's investment.

The model is able to capture the stylized facts observed empirically in the stock markets in the normal regime, such as long tails in the distribution of returns, short-memory in the return temporal series and long-range correlation in volatility.

Our simulations show that these empirical phenomena emerge endogenously from the collective behavior of the agents, despite the simplicity of the model. This suggests that the complex market dynamics do not arise from the complexity of the individual investors but rather from interactions between them through the market price formation.

## Keywords

Econophysics. Stock Markets. Microsimulation. Technical Analysis.

## Sumário

1	Introdução	15
1.1	Mercado de Ações	15
1.2	Motivação Geral	17
1.3	Microsimulação	17
1.4	Organização do texto	19
2	Modelagem de um Mercado de Ações	20
2.1	Pressupostos Básicos	20
2.2	Fatores relevantes na atuação dos agentes	23
2.3	Agentes Especuladores do Mercado	26
2.4	Modelagem Endógena	27
2.5	Mecanismo Quantificador da Estratégia	30
2.6	Limpeza do Mercado – <i>Market Clearing</i>	35
2.7	Atualização do estado financeiro dos Agentes	36
2.8	Regra de formação de preços	37
2.9	Tipos de agentes no mercado artificial	38
2.10	Resumo da modelagem	39
3	Estratégias de Análise Técnica	41
3.1	Análise Técnica de Investimentos	41
3.2	Estratégias Técnicas	43
3.3	Teste de Significância	52
4	Simulações e Experimentos	58
4.1	Implementação	58
4.2	Comparação com séries reais	66
4.3	Propriedades do mercado artificial	75
4.4	Experimentos	83
5	Conclusões	100
A	Geradores de números pseudo-aleatórios	107



## Lista de figuras

- 2.1 Fator de atenuação da ordem inicial,  $\Phi(\hat{\gamma}_i(t+1), \gamma_i^*)$ , para diferentes valores de  $\gamma_i^*$ , onde  $\gamma_1^* < \gamma_2^*$ . 32
- 3.1 O gráfico mostra a série de preços diária do Yahoo INC. em vermelho, a média móvel curta de 5 dias (1 semana) em azul e a média móvel longa de 21 dias (1 mês) em verde. 44
- 3.2 O gráfico mostra a série de preço diária do Yahoo INC. em vermelho, a média móvel curta de 5 dias (1 semana) em azul e a média móvel longa de 21 dias (1 mês) em verde. Embaixo está o gráfico de atividades produzido pela estratégia que se baseia no cruzamento das médias para a emissão de sinais de acordo com a Eq. 3-2. 45
- 3.3 O gráfico mostra a série de preços diária do Yahoo INC. em vermelho, a média móvel exponencial curta de 5 dias (1 semana) em azul e a média móvel exponencial longa de 21 dias (1 mês) em verde. 47
- 3.4 Em cima: gráfico mostra a série de preço diária do Yahoo INC em vermelho, a média móvel exponencial curta de 5 dias (1 semana) em azul e a média móvel exponencial longa de 21 dias (1 mês) em verde. Embaixo: o gráfico de atividades produzido pela estratégia que se baseia no cruzamento das médias para a emissão de sinais de acordo com a Eq. 3-11. 48
- 3.5 Em cima: O gráfico mostra a série de preço diária do Yahoo INC. Embaixo: O gráfico do momento para  $\tau = 5$  (azul)  $\tau = 21$  (verde). 49
- 3.6 Em cima: O gráfico mostra a série de preço diária do Yahoo INC. No meio: O gráfico do momento para  $\tau = 21$ . Embaixo: O gráfico de atividades produzido pela estratégia do momento para a emissão de sinais de compra ou venda, dada pela Eq. 3-13. 50
- 3.7 Em cima: O gráfico mostra a série de preço de fechamento diária do Yahoo INC. Embaixo: O gráfico do indicador RSI para  $\tau = 14$ . 52
- 3.8 Em cima: O gráfico mostra a série de preço de fechamento diária do Yahoo INC. No meio: O gráfico do  $RSI_\tau(t)$  para  $\tau = 14$ . Embaixo: O gráfico de atividades do  $RSI_\tau(t)$  para  $L_{inf} = 30$  e  $L_{sup} = 70$  e para a estratégia de compra ou venda dada pela Eq. 3-18. 53
- 4.1 Algoritmo do modelo. 60
- 4.2 Distribuição amostral de números aleatórios que seguem distribuição  $Gama(x; a, b)$  onde  $\overline{\gamma_i^*} = 1$  e  $(\overline{\Delta\gamma_i^*})^2 = 1$ . O gerador da biblioteca GSL [1] foi utilizado na implementação. 62
- 4.3 O gráfico mostra a heterogeneidade na emissão de sinais pelas estratégias técnicas no modelo. 63
- 4.4 Histograma do número de agentes atuando simultaneamente no mercado. Parâmetros  $N = 1000$ ,  $\phi = 0.3$  e  $n = 4$ . 65

4.5	Séries temporais dos retornos normalizados das séries: Run-02 (vermelho) e Yahoo (azul).	68
4.6	Séries temporais de preços reconstruídas a partir dos retornos normalizados: Run-03 (vermelho) e Yahoo (azul).	68
4.7	Distribuição dos retornos da Run-03 (vermelha) e Yahoo (azul). O gráfico está em escala semi-logarítmica e portanto, a Gaussiana (preta) forma uma parábola.	70
4.8	Distribuição acumulada da cauda da distribuição de retornos normalizados da Run-03 (vermelho) e Yahoo (azul). O gráfico está em escala semi-logarítmica e portanto o ajuste linear (preto) indica o comportamento de cauda exponencial.	71
4.9	Função de autocorrelação linear dos retornos para a Run-02 (vermelho) com $\kappa = 0$ , Run-21 com $\kappa = 1$ (preto) e Yahoo (azul). De acordo com a Tabela 4.2.	73
4.10	Função de autocorrelação dos módulos dos retornos para a Run-02 (vermelho) com $\kappa = 0$ , Run-21 com $\kappa = 1$ (preto) e Yahoo (azul). De acordo com a Tabela 4.2.	73
4.11	Função de autocorrelação do quadrado dos retornos para a Run-02 (vermelho) com $\kappa = 0$ , Run-21 com $\kappa = 1$ (preto) e Yahoo (azul). De acordo com a Tabela 4.2.	74
4.12	Comparação da evolução temporal dos preços do mercado artificial entre a Run-02 (vermelho), a Run-09 (verde), a Run-10 (azul) e a Run-11 (magenta).	77
4.13	Evolução temporal da distribuição da riqueza dos agentes, $w_i(t)$ , no mercado para a Run-02. A linha escura representa a evolução da riqueza total do mercado por agente.	78
4.14	Evolução temporal da distribuição do capital dos agentes, $C_i(t)$ , no mercado para a Run-02. A linha escura representa a evolução do capital total do mercado por agente para a Run-02. Note que esse valor permanece constante, pois não há mudança no capital total do mercado.	78
4.15	Evolução temporal da distribuição do número de ações dos agentes, $S_i(t)$ , no mercado para a Run-02. A linha escura representa a evolução do total de ações no mercado por agente para a Run-02. Note que esse valor permanece constante, pois não há mudança no número total de ações no mercado.	79
4.16	Evolução temporal da média da riqueza $w_i(t)$ por classe de estratégia: estratégia aleatória (vermelho), média móvel (verde), média móvel exponencial (azul), RSI (magenta) e momento (ciano).	80
4.17	Evolução temporal da média da quantidade de ativos livre de risco $C_i(t)$ por classe de estratégia e número total de ativos de risco $S_i(t)$ , também por classe de estratégia: estratégia aleatória (vermelho), média móvel (verde), média móvel exponencial (azul), RSI (magenta) e momento (ciano).	81

- 4.18 Evolução temporal da média da riqueza  $w_i(t)$  por classe de estratégia em um mercado real (IBM): estratégia aleatória (vermelho), média móvel (verde), média móvel exponencial (azul), RSI (magenta) e momento (ciano). 89
- 4.19 Riqueza  $w_{bin}$  média dos agentes para cada faixa da aversão ao risco  $\gamma_{bin}^*$ , para várias rodadas da Run-03 em  $T = 9000$ . O gráfico de baixo mostra os valores médios de  $w_{bin}$  sobre todas as rodadas e a regressão linear ordinária realizada sobre estes dados. 90
- 4.20 Série de preços para mercado com aumento de renda a uma taxa de 0.01% a cada passo. ! A linha verde é  $p(t) = p_0 \exp(n \cdot 10^{-4})$ . Experimento realizado sobre o Run-02 (ver Tabela 4.2). 91
- 4.21 Série de preço para as rodadas Run-96 (em cima) com  $\zeta = 0.10$  e Run-98 (em baixo) com  $\zeta = 0.01$ , de acordo com a Tabela 4.5. 92
- 4.22 Evolução temporal da média da riqueza  $w_i(t)$  por classe de estratégia: estratégia aleatória (vermelho), média móvel (verde), média móvel exponencial (azul), RSI (magenta) e momento (ciano). Run-98 em baixo com  $\zeta = 0.01$  e a Run-96 em cima com  $\zeta = 0.10$  (de acordo com a Tabela 4.5). 93
- 4.23 Distribuições dos retornos para um mercado somente com agentes aleatórios geradas pelas rodadas: Run-41 em cima com  $\kappa = 0$  e Run-72 em baixo com  $\kappa = 1$  (com *feedback* de volatilidade na regra de formação de preços Eq. 2-38). 94
- 4.24 Função de autocorrelação dos retornos e dos módulos de retornos para um mercado somente com agentes aleatórios gerados pela Run-41 com  $\kappa = 0$ . 95
- 4.25 Função de autocorrelação dos retornos e dos módulos de retornos para um mercado somente com agentes aleatórios gerados pela Run-72 com  $\kappa = 1$  (com *feedback* de volatilidade na regra de formação de preços Eq. 2-38). 96
- 4.26 Histograma do número de agentes atuando simultaneamente no mercado. Para Run-03 (vermelho) com  $\phi = 0.2$ , Run-02 (verde) com  $\phi = 0.3$  e Run-07 (azul) com  $\phi = 0.5$  (de acordo com a Tabela 4.6). 97
- 4.27 Séries de preço para Run-03 (vermelho) com  $\phi = 0.2$ , Run-02 (verde) com  $\phi = 0.3$  e Run-07 (azul) com  $\phi = 0.5$  (de acordo com a Tabela 4.6). Os gráficos foram transladados para melhor visualização. 97
- 4.28 Distribuição dos retornos para as rodadas Run-03 (vermelho) com  $\phi = 0.2$ , Run-02 (verde) com  $\phi = 0.3$  e Run-07 (azul) com  $\phi = 0.5$  (de acordo com a Tabela 4.6) 98
- 4.29 Histograma da distribuição do número de agentes atuando simultaneamente. Para Run-01 (vermelho) com  $N = 100$ , Run-02 (verde) com  $N = 1000$  e Run-06 (azul) com  $N = 5000$  (de acordo com a Tabela 4.7). 98
- 4.30 Distribuição dos retornos para as rodadas Run-01 (vermelho) com  $N = 100$ , Run-02 (verde) com  $N = 1000$  e Run-06 (azul) com  $N = 5000$  (de acordo com a Tabela 4.7). 99

4.31 Séries de preço para Run-01 (vermelho) com  $N = 100$ , Run-02 (verde) com  $N = 1000$  e Run-06 (azul) com  $N = 5000$  (de acordo com a Tabela 4.7). Os gráficos foram trasladados para melhor visualização.

99

A.1 Teste de correlação espacial para dois geradores congruenciais lineares. Este teste consiste em: dado um quadrado, dividido em 16 partes iguais, sortear as coordenadas  $x$  e  $y$  com um gerador e incrementar o contador de cada partição toda vez que o ponto sorteado pertencer a partição. Se o gerador é eficiente, ele vai sortear pontos uniformemente pela área do quadrado. Este teste foi realizado para  $a = 16807$  (esquerda) e  $a = 1277$  (direita). É possível notar que o gerador com  $a = 1277$  possui correlação, pois, as partições da diagonal do quadrado foram mais preenchidas.

108

## Lista de tabelas

2.1	Representação dos sinais emitidos pelo mecanismo de ativação, $\sigma_i(t)$ , de uma estratégia	29
2.2	Ordens efetivas dos agentes após a limpeza do mercado.	36
2.3	Tabela de parâmetros e variáveis de estado do modelo.	40
3.1	Estatística- $t$ da performance das estratégias de análise técnica.	56
4.1	Estratégias utilizadas na implementação do modelo.	63
4.2	Parâmetros utilizados nas rodadas: Run-02, Run-03 e Run-21.	66
4.3	Valores da curtose obtidos para as distribuições de retornos gerados pelas simulações da Tabela 4.1.	70
4.4	Parâmetros utilizados nos experimentos.	76
4.5	Valores de $\zeta$ utilizados nos experimentos. As rodadas são variações da Run-02 (ver Tabela 4.2).	84
4.6	Valores de $\phi$ utilizados nos experimentos. As simulações são variações da Run-02 (ver Tabela 4.2).	85
4.7	Valores de número de agentes utilizados nos experimentos. As simulações são variações da Run-02. Todos possuem fração de agentes técnicos $\phi = 0.3$ .	87

*We have to remember that what we observe is  
not nature in itself but nature exposed to our  
method of questioning.*

**Werner Heisenberg.**