

Avaliação de Estratégias de Negociação em um Mercado Financeiro Artificial baseado em Sistema Multi-Agentes

M. C. R. Leles, E. F. Sbruzzi, C. L. Nascimento Jr

Abstract— This work presents a computational framework for a multi-agent system simulation of the stock market. It is intended to replicate the interactions amongst agents through a double auction environment, thereby leading to an artificial market. Aiming at making agents able to autonomously take their own decisions, agents can rely on the Fundamental and/or Technical Analysis as the basis for their decision-making process. In this context, basically, there are two different approaches: i) fundamentalists and chartists are mixed in their expectations of the spot price; and ii) they are segregated based on their expectations, and switching rules between them are designed. The key innovative aspect of this work is the development of a computational platform which integrates heterogeneous agents of the two aforementioned categories. Several experiments were carried out. The results show that the time series resulted from the interactions of those agents resembles to financial time series, reproducing some of the stylized facts encountered thereof.

Keywords— Multi-agent System, Artificial Stock Market, Heterogeneous Agents, Performance Evaluation.

I. INTRODUÇÃO

O mercado financeiro pode ser classificado como um sistema: complexo, não linear, não estacionário, variante no tempo; e, ainda, sujeito a diversos fatores, incluindo [1]: eventos políticos; notícias econômicas; influência internacional, dentre outros. Diversos estudos comprovam que a predição dos retornos dos ativos financeiros é uma tarefa desafiadora [2].

Uma maneira de se atuar nesse mercado é por meio da Análise Fundamentalista, que utiliza fatores econômicos para estimar os valores intrínsecos dos ativos financeiros [3]. Outra maneira utiliza a Análise Técnica (AT), que se baseia no estudo da evolução temporal da série histórica de preços [4].

Diversos tipos de estratégias de negociação baseadas na AT foram propostas na literatura [5]. Algumas se baseiam em indicadores “clássicos” como médias móveis, índice de força relativa, entre outros. Recentemente, alguns estudos têm combinado essas ferramentas tradicionais com técnicas de inteligência artificial; de reconhecimento de padrões; e de processamento de sinais [6, 7, 8, 9].

Uma forma de avaliação das estratégias de negociação faz uso de séries históricas da evolução temporal do preço de determinado ativo financeiro, técnica conhecida como *backtesting*. A utilização dessa técnica visa verificar o desempenho que teria sido produzido por uma estratégia de negociação quando aplicada em determinada ativo. Diversos estudos se baseiam nesse tipo de abordagem [6, 10, 11, 12].

Destaca-se que esse processo possui duas limitações. A primeira é a suposição de que o investidor consiga negociar o ativo financeiro no preço em que a estratégia forneça o sinal de operação. A segunda é que nesse procedimento de simulação não é possível se verificar qual seria a influência na dinâmica dos preços provocada pela ordem de operação.

“Mercados Financeiros Artificiais” são uma alternativa para estudo de sistemas financeiros, não sofrendo dos dois problemas anteriores [13]. Nessa metodologia, que tem aumentado sua popularidade recentemente, a série estudada é resultado tanto da iteração entre diferentes tipos de agentes (cada participante individual no mercado) quanto do funcionamento detalhado do mecanismo de negociação entre eles [14, 15]. Esse tipo de abordagem possui a capacidade de ir além da economia tradicional [16, 17], uma vez que tais modelos consideram o mercado como um sistema multi-agentes em que cada agente possui características particulares, podendo diferir na forma autônoma como tomam suas próprias decisões. Por outro lado, na economia tradicional assume-se que cada agente é semelhante e racional [18].

Diversos modelos baseados em agentes foram propostos. Muitos dos quais, quando os agentes submetem uma ordem, enfrentam três parâmetros diferentes no seu processo decisório: o preço, a direção (compra ou venda) e o volume.

No presente trabalho, um novo modelo para simulação de mercados financeiros artificiais baseados em um sistema multiagentes é proposto. Partindo do modelo original de Chiarella & Iori [14] - no qual os agentes possuem três componentes: aleatório, fundamentalista e chartista (baseado em AT)-, algumas modificações são efetuadas, propiciando um ambiente em que agentes heterogêneos interagem entre si em um mecanismo de leilão duplo. Nesse modelo, os agentes decidem a direção da posição comprada (*long*) ou vendida (*short*) e o preço, enquanto a quantidade é fixada em uma unidade por ordem.

As principais contribuições do presente trabalho são: i) desenvolvimento de uma plataforma computacional para simulação de sistemas multiagentes; ii) proposta de uma maneira alternativa de se precificar as ordens dos agentes, utilizando-se informação do livro de ordens; iii) a interação entre agentes heterogêneos em um mecanismo de leilão duplo propiciando a formação de uma série de preços resultante desse mercado artificial, a qual possui algumas características que se assemelham a séries financeiras reais. Ainda, alguns dos fatos estilizados presentes no mercado financeiro são reproduzidos a partir da utilização desse modelo.

O restante desse texto é organizado como se segue. Na seção 2 é proposta uma fundamentação teórica dos principais conceitos necessários; a metodologia é ilustrada na seção 3. Os resultados experimentais são apresentados na seção 4 e discutidos na seção 5. Finalmente, a conclusão desse trabalho e algumas direções futuras são tema da seção 6.

M. C. R. Leles, Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil, mleles@ufsj.edu.br.

E. F. Sbruzzi, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, elton@ita.br.

C. L. Nascimento Jr, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, cairo@ita.br.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção é apresentada uma breve discussão teórica acerca dos principais conceitos relacionados ao desenvolvimento do presente trabalho. Esse texto se inicia com uma sucinta revisão de alguns sistemas multiagentes em finanças apresentados anteriormente na literatura, incluindo o modelo proposto por Chiarella & Iori [14]. A utilização de ferramentas baseadas na AT é brevemente explorada. Finalmente, algumas características estatísticas comuns a diversas séries financeiras (fatos estilizados) são apresentadas.

Destaca-se, entretanto, que modelos baseados em agentes têm sido aplicados em diversas áreas do conhecimento [19, 20]. Para uma revisão recente sobre plataformas de desenvolvimento desse tipo de sistemas em diferentes aplicações sugere-se [21] e referencias nele contidas.

A. Sistemas MultiAgentes em Finanças

Maslov [22] propõe que os agentes decidam o preço para comprar (vender) aleatoriamente em algum valor acima (abaixo) do preço atual. Lux & Marchesi [23] propõem que os agentes decidam de acordo com a combinação de três componentes: o fundamentalista, o grafista e o aleatório. O componente fundamentalista usa o valor fundamental do título, por exemplo; no caso de ações, o valor intrínseco da empresa calculado usando as informações em seu balanço. Eles vendem (compram) quando o preço é maior (menor) do que o valor intrínseco da ação ou o preço fundamental. Para uma discussão recente acerca desse tema sugere-se [24]. O componente grafista usa os dados históricos da série de preços (conforme discutido a seguir). O componente aleatório, por sua vez, representa os participantes que acreditam que eles têm um sinal correlacionado com retornos futuros, mas na verdade se trata de uma flutuação randômica.

No modelo de Chiarella & Iori [14] os agentes decidem a direção e o preço, enquanto a quantidade é fixada em uma unidade por pedido. Em termos de direção, a expectativa de cada agente de retorno pontual consiste em uma combinação de três componentes diferentes: fundamentalista, grafista e aleatório:

$$\tilde{r}_{t,t+\tau}^i = g_1^i \frac{P^f - P_t}{P_t} + g_2^i \bar{r}_{L_i} + n_i \varepsilon_t \quad (1)$$

onde g_1^i é o peso do componente fundamentalista que é positivo e g_2^i é o peso do componente grafista que é positivo no caso dos seguidores de tendência e negativo no caso dos osciladores. Cada agente tem valores diferentes, seguindo uma distribuição normal, de acordo com: $g_1^i \approx N(0, \sigma_1)$, $g_2^i \approx N(0, \sigma_2)$ e $n_i \approx N(0, \sigma_n)$. O parâmetro \bar{r}_{L_i} é o valor da média móvel do retorno ao longo do período L_i . Esse parâmetro, entretanto, não é aqui utilizado. A equação do preço futuro esperado do agente i até o momento $t + \tau$ é:

$$\tilde{p}_{t+\tau}^i = p_t e^{\tilde{r}_{t,t+\tau}^i} \quad (2)$$

B. Análise Técnica

O objetivo geral da AT é extrair padrões (não lineares) que serão utilizados para a construção de estratégias de negociação, a partir análise da série de preços de um ativo financeiro, capturando movimentos de mercado significativos e ignorando suas flutuações aleatórias [25].

Um indicador é basicamente um operador ou um mapeamento que transforma um sinal de entrada (preços passados dos ativos em análise) em um sinal de saída (ordens enviadas ao mercado) por meio de um conjunto pré-fixado de regras. Espera-se que esse sinal de saída seja capaz de expor algumas características escondidas no sinal de entrada original. No presente trabalho, a escolha dos indicadores foi feita considerando-se: i) selecionar alguns dos indicadores mais utilizados tanto por investidores quanto por acadêmicos; ii) selecionar indicadores de diferentes categorias, alguns baseados em seguidores de tendência e outros em osciladores.

Os indicadores seguidores de tendência produzem sinais que seguem o movimento do mercado [4]. O indicador mais utilizado para criação dessa classe de estratégias se baseia na utilização de Médias Móveis. A média móvel simples, $MA_t[L]$, da série temporal de preços $p_t; t=1,2,\dots,N$, para um período de L dias, $L \leq N$, é:

$$MA_t[L] = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L p_{t-l} \quad (3)$$

Um oscilador é um indicador que flutua acima e abaixo de uma linha central ou entre níveis pré-definidos a medida que seu valor muda ao longo do tempo. Osciladores baseados em uma linha central são usados na identificação da força e/ou direção do *momentum* do movimento dos preços. Como exemplo pode-se citar oscilador de Momentum, que tem como objetivo quantificar a variação dos preços, acompanhando a velocidade com a qual se movem, em determinado período de tempo. É definido de acordo com:

$$M_t[K] = p_t - p_{t-K} \quad (4)$$

C. Fatos Estilizados

Uma das intenções de simulações de mercado financeiro é reproduzir uma lista de fatos estilizados presentes em séries financeiras. Brevemente, fatos estilizados são as propriedades estatísticas comuns dessas séries. Por um lado, alguns desses fatos referem-se ao formato da função de distribuição de probabilidade dos retornos. Por exemplo, Cont [26] mostra que distribuições de retornos diários ou intra-diários são leptocúrticas. Por outro lado, fatos estilizados também podem ser derivados da função de autocorrelação temporal (ACF). Por exemplo, uma lenta decadência do ACF em retornos absolutos, a ausência de correlação após algum tempo ou lag e a formação de clusters de volatilidade [2, 27].

No presente trabalho o modelo é avaliado em relação a dois fatos estilizados diferentes: i) autocorrelação dos retornos ao quadrado; e ii) excesso de curtose.

III. ABORDAGEM PROPOSTA

Nessa seção é apresentada e discutida a abordagem aqui proposta. São descritos os tipos de agentes utilizados, o mecanismo de negociação entre agentes assim como o método de formação do preço.

A. Tipos de Agentes

Os agentes são autônomos, isto é, são capazes de interagir com o meio e tomar decisões de forma independente. Mas não são adaptativos, ou seja, não são capazes de aprender a partir da própria experiência. Os agentes possuem informação incompleta e se baseiam em diferentes premissas para formação de sua expectativa de preço futuro, podendo ser divididos em duas categorias:

- **Modelo de Chiarella & Iori [14]:** sua expectativa de preço se baseia em um componente aleatório e/ou fundamentalista. São divididos em três tipos: i) Aleatório (ou *Zero Intelligence* [28]); ii) Fundamentalista; e iii) combinação dos dois componentes anteriores.
- **Baseados em AT:** utilização de diferentes tipos de indicadores para formação de sua expectativa de preço. São divididos em função do tipo de indicador utilizado: i) Média Móvel; e ii) Momentum.

A Figura 1 ilustra o processo decisório dos Agentes.

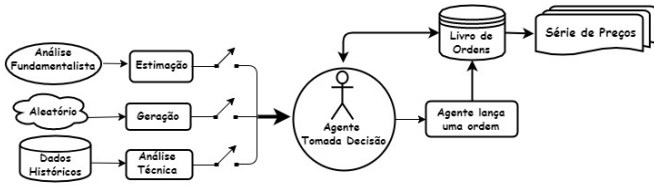


Figura 1. Processo decisório dos diferentes tipos de Agentes.

B. Mecanismo de Negociação

O mecanismo de negociação se baseia em um mercado de leilão duplo. No modelo original de Chiarella & Iori [14], o preço fundamentalista, parâmetro p_t^f , é mantido constante ao longo de toda a simulação. No presente trabalho, entretanto, esse parâmetro segue um modelo de passeio aleatório:

$$p_t^f = p_{t-1}^f + \xi \quad (5)$$

onde $p_1^f = 100, \xi \approx N(0, \sigma_\xi)$.

Com o intuito de se padronizar a notação para o preço futuro estimando independentemente do tipo de agente, define-se o preço estimado no instante t como \hat{p}_t . Assim, $\hat{p}_t = \tilde{p}_t$ para o agente baseado em Chiarella & Iori [14], equação (2); $\hat{p}_t = MA_t[L]$ para o agente baseado em médias móveis, equação (3); e $\hat{p}_t = M_t[K]$ para o agente baseado no oscilador momentum, equação (4).

O agente lança uma ordem de compra, b_t^i , (venda, a_t^i) se seu preço estimado for maior (menor) que o preço atual, de acordo com a equação (6):

$$\begin{cases} \hat{p}_t = b_t^i, & \text{se } \hat{p}_t \geq p_t; \\ \hat{p}_t = a_t^i, & \text{se } \hat{p}_t \leq p_t. \end{cases} \quad (6)$$

A Figura 2 apresenta um esquemático da interação entre os agentes e o mecanismo de negociação, assim como a evolução temporal da série de preços resultante.

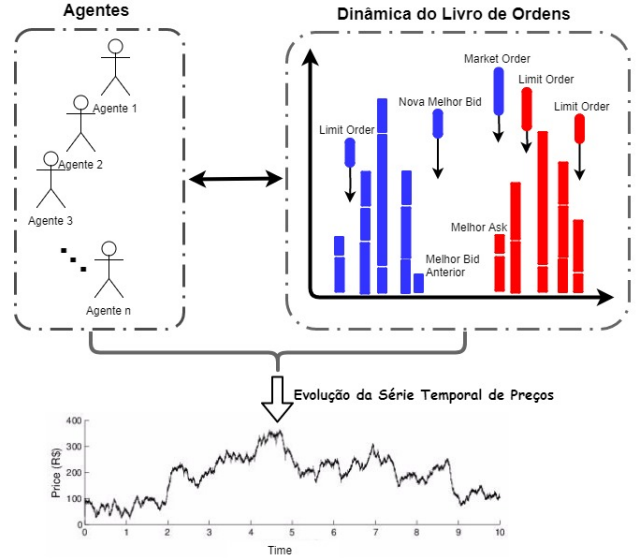


Figura 2. Esquemático do processo de negociação. A série temporal é resultado da interação entre os agentes e o livro de ordens

Se b_t^i (a_t^i) é menor (maior) do que a melhor ask, a_t^* , (bid, b_t^*) ocorre uma negociação, isto é tem-se uma *market order*, sendo o preço do atualizado para esse valor. Caso contrário, a ordem permanecerá no livro de ordens, ou seja, tem-se uma *limit order*.

Uma ordem permanece no livro enquanto nenhuma outra ordem de contrapartida o igualar, ou até o final do período em que ela será automaticamente cancelada em função do seu *lifespan*, parâmetro τ .

C. Estimação de preço futuro

Os agentes inspirados no modelo de Chiarella & Iori [14] utilizam as equações (1) e (2) para definição do preço futuro.

Para utilização de médias móveis como ferramentas de construção de estratégias, deve-se observar o seu cruzamento com a série temporal de preços. Os sinais de compra (venda) são acionados quando a média móvel cruza essas séries de baixo para cima (de cima para baixo).

Para utilização do oscilador momentum como ferramentas de construção de estratégias, deve-se observar o seu cruzamento com o valor zero, o que é interpretado como um sinal. O mesmo se refere a um sinal de compra (venda) se o cruzamento ocorre de baixo para cima (cima para baixo).

Destaca-se, entretanto, que para sua utilização para modelar o processo de decisão de um agente, uma modificação nessas regras precisa ser efetuada. De fato, a cada iteração um agente é escolhido aleatoriamente. Existe, portanto, uma baixa probabilidade do agente que usa uma média móvel, por exemplo, ser sorteado exatamente no dia em que ocorre o cruzamento da média móvel com o preço. Além disso, o agente sorteado deve, necessariamente, submeter uma ordem.

Nesse sentido, optou-se por determinar que a ordem emitida pelo agente seja: i) igual à média móvel do período, parâmetro L na equação (3), se o mesmo se basear nesse indicador; e ii) igual ao valor do preço no período utilizado para cálculo do momentum, parâmetro K , na equação (4).

D. Processo de formação do preço final

Basicamente, existem duas alternativas para definição do preço final a ser submetido pelo agente, que se diferenciam na medida em que o agente pode ou não utilizar informações das melhores ofertas presentes no livro de ordens em seu processo decisório.

Por um lado, caso opte por utilizar tais informações, o agente age de acordo com:

$$\begin{cases} b_t^i = b_t^* + |\kappa^i| \\ a_t^i = a_t^* - |\kappa^i| \end{cases} \quad (7)$$

onde $\kappa^i \approx N(0, \sigma_\kappa)$.

Por outro lado, seguindo o modelo de Chiarella & Iori [14], os agentes estão dispostos a abrir uma posição comprada (vendida) ao preço b_t^i (a_t^i) que é dependente da expectativa futura de preço $\hat{p}_{t+\tau}$, de acordo com:

$$\begin{cases} b_t^i = \hat{p}_{t+\tau} (1 - k^i) \\ a_t^i = \hat{p}_{t+\tau} (1 + k^i) \end{cases} \quad (8)$$

onde k^i é distribuído uniformemente entre 0 e k^{\max} .

Pela análise da equação (8) pode-se observar que o agente não consulta informações do livro de ordem (exceto o preço atual) para sua decisão.

E. Evolução da riqueza de um agente

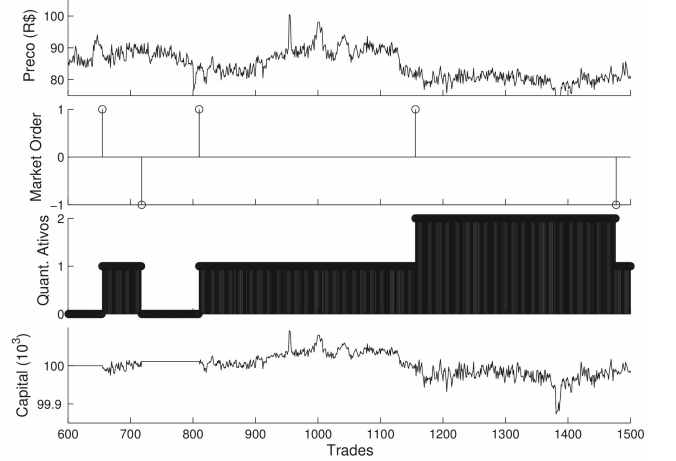
A Figura 3 mostra alguns aspectos da interação de um agente com o mercado artificial. Evolução da série de preços é mostrada no gráfico superior, conforme Figura 4a. As *market orders* submetidas pelo agente são apresentadas no segundo gráfico, em que a compra (venda) é representada por um sinal positivo (negativo). O terceiro gráfico mostra o acúmulo dessas operações, informando a quantidade de papéis do ativo que o agente possui no momento. O gráfico inferior mostra a evolução temporal da curva de capital do agente. Finalmente, a partir dessa série temporal algumas métricas de desempenho são calculadas.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

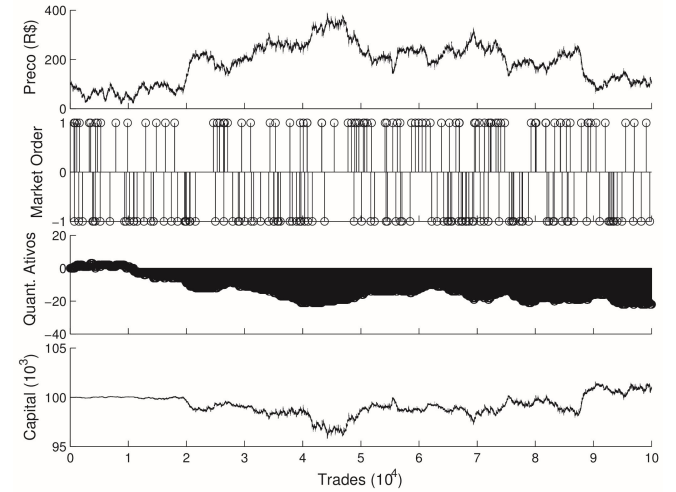
Nessa seção são apresentados os resultados experimentais do presente trabalho.

A Figura 4 apresenta a evolução temporal das séries financeiras para quatro experimentos diferentes: as três primeiras utilizando informações das melhores ofertas no livro de ordens (em que se varia o número de agentes e/ou o parâmetro σ_κ), enquanto a última não.

Na Figura 5 são apresentados alguns detalhes da evolução temporal das curvas de capital dos trechos destacados na Figura 4. A Figura 6 destaca um comparativo do número de operações realizadas pelos diferentes tipos de agentes.

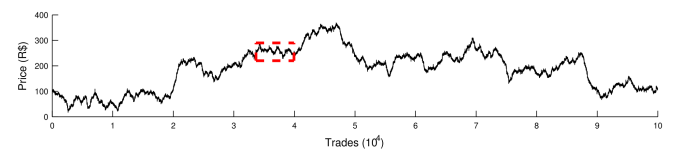


(a) Detalhe inicial das ordens submetidas pelo agente e o desempenho obtido.

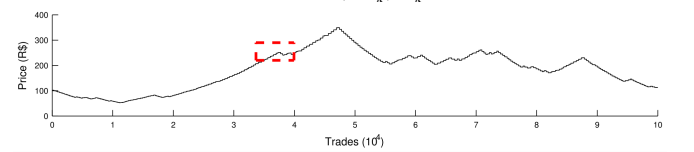


(b) Evolução completa das ordens submetidas por um agente.

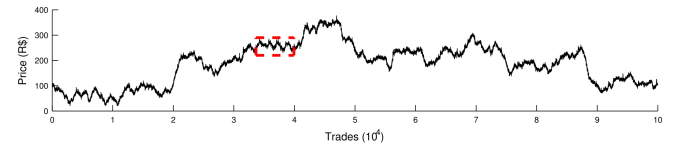
Figura 3: Interação de um agente com o mercado financeiro artificial.



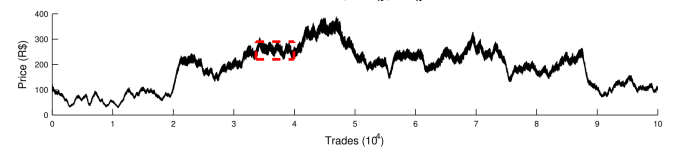
(a) Simulação: mil agentes, $\kappa \approx N(0, \sigma_\kappa)$, $\sigma_\kappa = 3$.



(b) Simulação: mil agentes, $\kappa = \Delta$.



(c) Simulação cem agentes, $\kappa \approx N(0, \sigma_\kappa)$, $\sigma_\kappa = 3$.



(d) Simulação do Modelo de Chiarella & Iori [14], mil agentes.

Figura 4: Evolução temporal da série de preços a partir de duas abordagens diferentes.

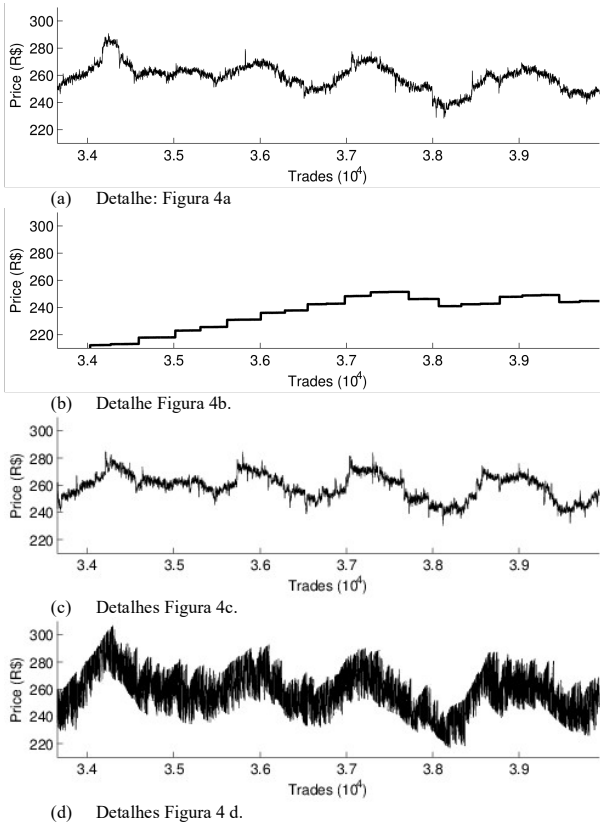


Figura 5: Detalhes da evolução temporal das curvas de capital apresentadas na Figura 4.

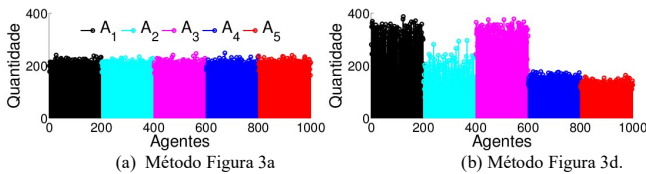


Figura 6: Número de operações realizadas pelos diferentes tipos de agentes: A1, apenas componente aleatório; A2, apenas componente fundamentalista; A3, combinação dos dois anteriores A4, oscilador momentum; e A5, média móvel.

As Figuras 7 e 8 ilustram, via gráfico *boxplot*, a distribuição dos resultados de algumas métricas de desempenho - lucro e índice de Sharpe, respectivamente - para os diferentes tipos de agentes nas simulações apresentadas na Figura 4.

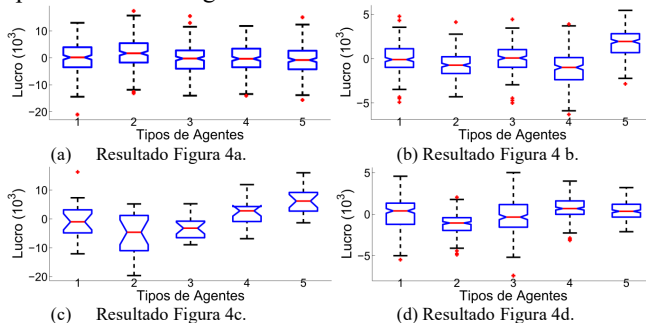


Figura 7: Gráficos *boxplot* ilustrando o lucro obtido pelos diferentes tipos de agentes: 1) apenas componente aleatório, 2) apenas componente fundamentalista, 3) combinação dos dois anteriores, 4) oscilador momentum, e 5) média móvel.

Testes estatísticos confirmaram a presença dos fatos estilizados descritos na seção II.C nas séries temporais resultantes das interações entre os agentes e o mecanismo de negociação, Figura 4. Entretanto, os mesmos são omitidos aqui em função da limitação de espaço.

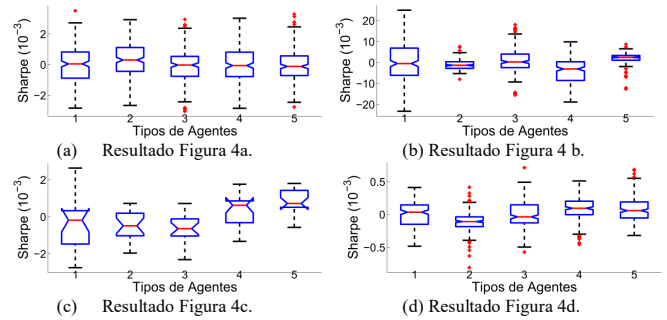


Figura 8: Gráficos *boxplot* ilustrando o índice de Sharpe obtido pelos diferentes tipos de agentes, seguindo o mesmo procedimento adotado na Figura 6.

IV. DISCUSSÃO

A utilização da Análise Técnica, embora aceita entre profissionais do mercado financeiro, ainda é controversa no meio acadêmico. Diversos estudos defendem a sua utilização [12, 29] enquanto outros a criticam [30, 31]. Nazário et. al [1] apresentam uma revisão recente incluindo trabalhos no mercado de ações e de derivativos. Dentre os estudos analisados, setenta e nove defendem a AT, seis a criticam e quatro são inconclusivos. Park & Irwin [32] apresentam um estudo incluindo outros mercados.

A abordagem de mercado financeiro artificial aqui apresentada pode contribuir com essa discussão, uma vez que diversas estratégias de AT podem ser empregadas e seu estudo efetuado em diferentes condições de mercado.

Dois métodos para formação do preço final do agente foram apresentados. Uma discussão mais detalhada a esse respeito pode ser obtida em [33].

Pela análise da evolução das séries de preços apresentadas, pode ser observado que diferentes dinâmicas de mercados foram obtidas. Ainda, alguns fatos estilizados presentes em mercados reais foram reproduzidos.

De forma geral, não houve diferença estatisticamente significativa entre a distribuição de cada tipo de agente, de acordo com o teste de Mann-Whitney [34]. Nesse teste, a hipótese nula (H_0) indica que as amostras de duas distribuições diferentes possuem medianas equivalentes, contra a hipótese alternativa que uma população tende a possuir valores mais altos que a outra. Destaca-se, entretanto, que os agentes utilizados são não adaptativos.

V. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi apresentado um novo modelo para simulação de mercados financeiros artificiais utilizando um sistema multi-agentes. A interação entre diferentes agentes em um mecanismo de leilão duplo propiciou a formação de uma série de preços simulados que replicam os preços obtidos em um mercado financeiro. Os resultados mostram que o modelo proposto é capaz de reproduzir, com sucesso, alguns dos fatos estilizados presentes em mercados financeiros, para diferentes quantidades de agentes utilizadas. O desempenho de agentes baseados em AT pode ser avaliado sob diferentes condições de mercado. A abordagem aqui apresentada pode contribuir, portanto, com o debate acadêmico acerca da lucratividade de estratégias baseadas na Análise Técnica.

Como trabalhos futuros, agentes adaptativos, capazes de aprender, podem ser incluídos. Variações na riqueza inicial do agente e no volume de ações negociado podem impactar na dinâmica do mercado. Além disso, a utilização de alavancagem é uma prática comum que pode ser acrescentada. E, ainda, o estudo da interação entre agentes que operam em diferentes escalas de tempo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) nos processos 2016/04992-6 e 2017/20248-8.

REFERÊNCIAS

- [1] R. T. F. Nazário, J. L. e Silva, V. A. Sobreiro, and H. Kimura, "A literature review of technical analysis on stock markets," *The Quarterly Review of Economics and Finance*, vol. 66, pp. 115–126, 2017.
- [2] R. Cont, "Empirical properties of asset returns: stylized facts and statistical issues," *Quantitative Finance*, vol. 1, no. 2, pp. 223–236, 2001.
- [3] R. W. Banz, "The relationship between return and market value of common stocks," *Journal of financial economics*, vol. 9, no. 1, pp. 3–18, 1981.
- [4] J. J. Murphy, *Technical Analysis of the Financial Markets: A Comprehensive Guide to Trading Methods and Applications*. New York Institute of Finance, 1999.
- [5] R. W. Colby, *The Encyclopedia of Technical Market Indicators*, 2nd ed. McGraw-Hill, 2003.
- [6] E. F. Sbruzzi, M. C. R. Leles, and C. L. Nascimento-Júnior, "Introducing learning automata to financial portfolio components selection," in *Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 2018, pp. 1–6.
- [7] M. C. R. Leles, L. A. Mozelli, C. L. Nascimento-Junior, E. F. Sbruzzi, and H. N. Guimarães, "Study on Singular Spectrum Analysis as a new technical oscillator for trading rules design," *Fluctuations and Noise Letters*, vol. 17, no. 4, p. 1850034, 2018.
- [8] M. C. R. Leles, L. A. Mozelli, and H. N. Guimarães, "New trend-following indicator: Using SSA to design trading rules," *Fluctuation and Noise Letters*, vol. 16, no. 2, p. 1750016, 2017.
- [9] H. Liu, P. Ji, and J. Jin, "Intra-day trading system design based on the integrated model of wavelet de-noise and genetic programming," *Entropy*, vol. 18, no. 12, p. 435, 2016.
- [10] M. C. R. Leles, A. S. Vale-Cardoso, M. G. Moreira, E. F. Sbruzzi, C. L. Nascimento-Jr, and H. N. Guimarães, "A Singular Spectrum Analysis based trend-following trading system," in *2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 2018, pp. 1–5.
- [11] Y. Deng, F. Bao, Y. Kong, Z. Ren, and Q. Dai, "Deep direct reinforcement learning for financial signal representation and trading," *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, vol. 28, no. 3, pp. 653–664, 2017.
- [12] W. Brock, J. Lakonishok, and B. LeBaron, "Simple technical trading rules and the stochastic properties of stock returns," *Journal of Finance*, vol. 47, no. 5, pp. 1731–1764, 1992.
- [13] K. Yim, G. Oh, and S. Kim, "Understanding financial market states using an artificial double auction market," *PloS one*, vol. 11, no. 3, p. e0152608, 2016.
- [14] C. Chiarella and G. Iori, "A simulation analysis of the microstructure of double auction markets," *Quantitative finance*, vol. 2, no. 5, pp. 346–353, 2002.
- [15] S. Pastore, L. Ponta, and S. Cincotti, "Heterogeneous information-based artificial stock market," *New Journal of Physics*, vol. 12, no. 5, p. 053035, 2010.
- [16] J. D. Farmer and D. Foley, "The economy needs agent-based modelling," *Nature*, vol. 460, no. 7256, p. 685, 2009.
- [17] J.-P. Bouchaud, "Economics needs a scientific revolution," *Nature*, vol. 455, no. 7217, p. 1181, 2008.
- [18] A. Chakraborti, I. M. Toke, M. Patriarca, and F. Abergel, "Econophysics review: ii. agent-based models," *Quantitative Finance*, vol. 11, no. 7, pp. 1013–1041, 2011.
- [19] K. Raya, C. G. Gaxiola, and M. Castanon, "Agent-based model for self management of network flows using negotiation," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 1, pp. 210–215, 2018.
- [20] U. Wilensky and W. Rand, *An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. MIT Press, 2015.
- [21] S. Abar, G. K. Theodoropoulos, P. Lemarinier, and G. M. O'Hare, "Agent based modelling and simulation tools: A review of the state-of-art software," *Computer Science Review*, vol. 24, pp. 13–33, 2017.
- [22] S. Maslov, "Simple model of a limit order-driven market," *Physica A: Statistical Mechanics and Applications*, vol. 278, n.3, pp. 571–578, 2000.
- [23] T. Lux and M. Marchesi, "Volatility clustering in financial markets: a microsimulation of interacting agents," *International journal of theoretical and applied finance*, vol. 3, no. 04, pp. 675–702, 2000.
- [24] J. Bonart and F. Lillo, "A continuous and efficient fundamental price on the discrete order book grid," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 503, pp. 698 – 713, 2018.
- [25] A. W. Lo, H. Mamaysky, and J. Wang, "Foundations of technical analysis: Computational algorithms, statistical inference, and empirical implementation," *The Journal of Finance*, vol. 55, n. 4, pp. 1705–1765, 2000.
- [26] R. Cont, "Volatility clustering in financial markets: empirical facts and agent-based models," in *Long memory in economics*. Springer, 2007, pp. 289–309.
- [27] W. Easterly and R. Levine, "What have we learned from a decade of empirical research on growth? it's not factor accumulation: Stylized facts and growth models," *The world bank economic review*, vol. 15, no. 2, pp. 177–219, 2001.
- [28] D. K. Gode and S. Sunder, "Allocative efficiency of markets with zero-intelligence traders: Market as a partial substitute for individual rationality," *Journal of political economy*, vol. 101, no. 1, pp. 119–137, 1993.
- [29] G. Cohen and E. Cabiri, "Can technical oscillators outperform the buy and hold strategy?" *Applied Economics*, vol. 47, n.30, pp.3189–3197, 2015.
- [30] N. Taylor, "The rise and fall of technical trading rule success," *Journal of Banking & Finance*, vol. 40, pp. 286 – 302, 2014.
- [31] R. Sullivan, A. Timmermann, and H. White, "Data-snooping, technical trading rule performance, and the bootstrap," *Journal of Finance*, vol. 54, no. 5, pp. 1647–1691, 1999.
- [32] C.-H. Park and S. H. Irwin, "What do we know about the profitability of Technical Analysis?" *Journal of Economic Surveys*, vol. 21, no. 4, pp. 786–826, 2007.
- [33] M. D. Gould, M. A. Porter, S. Williams, M. McDonald, D. J. Fenn, and S. D. Howison, "Limit order books," *Quantitative Finance*, vol. 13, no. 11, pp. 1709–1742, 2013.
- [34] H. B. Mann and D. R. Whitney, "On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other," *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 18, no. 1, pp. 50–60, 1947.