

Mercado de Leilão: Uma Aplicação com Modelo Baseado em Agentes


Auction Market: An Application with Agent-Based Model

Luis Gustavo Bornia

Mestre

Universidade Federal de Santa Catarina

luis.gustavo.bornia@gmail.com


 <https://orcid.org/0009-0007-4776-7283>

Helberte João França Almeida

Doutor

Universidade Federal de Santa Catarina

Helberte.almeida@ufsc.br


 <https://orcid.org/0000-0003-0163-0197>

Adilson Giovanini

Doutor

Universidade do Estado de Santa Catarina

adilson.giovanini@udesc.br


 <https://orcid.org/0000-0001-8948-1186>

Mauricio Simiano Nunes

Doutor

Universidade Federal de Santa Catarina

mauriciosimianonunes@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-2587-9966>

A lista completa com informações dos autores está no final do artigo ●

RESUMO

Modelos baseados em agentes são ferramentas essenciais na Economia, permitindo simular e avaliar políticas econômicas em ambientes dinâmicos. Assim, tais modelos reduzem a distância entre teoria e realidade, proporcionando um ambiente virtual para testar decisões econômicas antes de sua implementação. Neste contexto, o estudo desenvolve um modelo baseado em agentes para representar o comportamento dos agentes em um mercado de leilão duplo, no qual compradores e vendedores ajustam suas ofertas e expectativas de preços ao longo do tempo. Os resultados demonstram que o modelo é compatível com a teoria de leilões, com os preços atingindo um equilíbrio dinâmico conforme as expectativas dos agentes se ajustam. Esses resultados sinalizam a aplicabilidade da modelagem baseada em agentes na análise de mercados descentralizados, oferecendo insights valiosos para o aprimoramento de mecanismos de leilão e políticas econômicas.

Palavras-chave: Modelos Baseados em Agentes; Leilão Duplo; Dinâmica de Preços.

ABSTRACT

Agent-based models are essential tools in Economics, enabling the simulation and evaluation of economic policies in dynamic environments. Thus, this models bridge the gap between theory and reality by providing a virtual space to test economic decisions before implementation. In this context, this study develops an

agent-based model to represent the behavior of agents in a double auction market, where buyers and sellers adjust their bids and price expectations over time. The results show that the model is consistent with auction theory, with prices reaching a dynamic equilibrium as agents' expectations adjust. The results signalize the applicability of agent-based modeling in analyzing decentralized markets, offering valuable insights for improving auction mechanisms and economic policies.

Keywords: Agent-Based Models; Double Auction; Price Dynamics.

JEL: C0; D0; D8.

Recebido em: 01-05-2005. Aceito em: 01-05-2005.

1.Introdução

As economias reais são sistemas dinâmicos e complexos, nos quais muitos agentes interagem continuamente em ambientes caracterizados por incerteza, restrições informacionais e aprendizado adaptativo (Tesfatsion, 2006). Modelos econômicos tradicionais, baseados na hipótese de racionalidade plena e equilíbrio geral, frequentemente recorrem a simplificações analíticas que dificultam a incorporação de aspectos fundamentais da tomada de decisão dos agentes. Embora esses modelos tenham sido bem-sucedidos em fornecer insights teóricos importantes, há uma crescente evidência empírica de que o comportamento dos agentes frequentemente se desvia de padrões estritamente racionais, como demonstrado por Marin e Fernandez (2018). Esses desvios ocorrem devido a fatores como racionalidade limitada, heurísticas de decisão e interações estratégicas que desafiam os pressupostos da teoria econômica tradicional.

Nos últimos anos, a Economia Computacional emergiu como uma alternativa capaz de lidar com essa complexidade, utilizando simulações para explorar padrões emergentes e efeitos dinâmicos em sistemas econômicos. Com o aumento exponencial do poder computacional, tornou-se possível modelar mercados descentralizados, heterogeneidade de agentes e processos dinâmicos de ajuste, superando limitações impostas por modelos de equilíbrio analítico. Amman (1997) define a Economia Computacional como uma metodologia capaz de solucionar problemas econômicos utilizando equipamentos computacionais, permitindo a implementação de modelos que incorporam aprendizado, adaptação e interações não lineares.

Dentre as diversas abordagens dentro da Economia Computacional, destaca-se a *Agent-Based Computational Economics* (ACE), que modela sistemas econômicos a partir da interação de agentes autônomos (Tesfatsion, 2006). Diferentemente dos modelos tradicionais, que impõem um equilíbrio exógeno e assumem comportamento otimizado dos agentes, a abordagem baseada em agentes permite a evolução dinâmica das decisões, considerando a formação endógena de padrões macroeconômicos a partir de regras de decisão individuais. Assim, a ACE oferece uma alternativa mais realista para o estudo de mercados descentralizados, onde os agentes ajustam suas estratégias em resposta a interações locais e ao ambiente econômico em constante mudança.

Neste contexto, o presente estudo busca contribuir com a literatura ao desenvolver um modelo baseado em agentes para simular a dinâmica de um mercado de leilão duplo, investigando como os preços emergem a partir da interação entre compradores e vendedores. O mercado de leilão duplo é caracterizado por um processo no qual compradores fazem lances pelos produtos a preços que estariam dispostos a pagar, enquanto vendedores estabelecem preços mínimos pelos quais aceitariam vender. A transação ocorre quando um comprador apresenta uma oferta maior ou igual ao preço estabelecido por um vendedor, formando um processo iterativo que leva à convergência dos preços ao longo do tempo.

A contribuição deste estudo é demonstrar como a modelagem baseada em agentes pode capturar a trajetória dinâmica de formação de preços e a convergência ao equilíbrio em um mercado descentralizado, destacando o papel de diferentes parâmetros no comportamento dos agentes. O modelo desenvolvido diferencia-se de abordagens anteriores por sua capacidade de simular um processo de ajuste sem impor restrições exógenas de equilíbrio, permitindo que a estrutura de mercado emergja das interações individuais. Além disso, este estudo fornece evidências sobre a robustez dos resultados teóricos da teoria de leilões ao testar diferentes configurações e analisar como a heterogeneidade dos agentes influencia a dinâmica do mercado.

Do ponto de vista metodológico, a modelagem baseada em agentes utilizada neste trabalho permite explorar a sensibilidade do mercado a diferentes configurações institucionais e parâmetros de comportamento, como a variação na função utilidade dos agentes e a estrutura do processo de oferta. Isso possibilita simulações de mercados reais, nos quais a racionalidade dos agentes é limitada e as estratégias são ajustadas ao longo do tempo. Dessa forma, o modelo desenvolvido não apenas valida conceitos teóricos estabelecidos, mas também abre espaço para futuras investigações sobre o impacto de regras institucionais, imperfeições informacionais e aprendizado adaptativo na formação de preços em leilões.

Além das contribuições teóricas e metodológicas, este estudo possui implicações para a formulação de políticas públicas voltadas à regulação de mercados baseados em leilões, como os mercados de energia, telecomunicações e licitações públicas. Ao fornecer um modelo que captura a dinâmica dos preços e o impacto de diferentes estruturas de mercado, este trabalho pode auxiliar na avaliação de mecanismos de leilão

mais eficientes e na mitigação de possíveis falhas de mercado decorrentes de comportamentos estratégicos dos agentes.

A estrutura do presente estudo está organizada da seguinte forma, além desta introdução. A seção dois apresenta a revisão da literatura sobre modelagem baseada em agentes e estudos correlatos. A seção três descreve a implementação computacional do modelo, detalhando os parâmetros e regras de decisão dos agentes. A seção quatro discute os resultados obtidos, analisando a trajetória dos preços e o impacto de diferentes configurações. Por fim, a seção cinco apresenta as considerações finais, destacando as principais contribuições, limitações do modelo e sugestões para pesquisas futuras.

2.Referencial Teórico

2.1 Leilões

Leilões são importantes formas de negociação em economia. Diversos mercados apresentam comportamentos em formas similares a leilões. De acordo com Klemperer (1999), três principais aplicações podem ser encontradas no mercado de leilões, a saber: i) leilões são definidores de preço; ii) leilões são excelentes meios para testes de teorias econômicas em especial, na área de teoria dos jogos; iii) leilões são a base para muitos trabalhos fundamentais; Ademais, o autor descreve os principais e mais simples modelos encontrados em leilões, cita-se: ofertas ascendentes; ofertas descendentes; primeiro preço de oferta selada; segundo preço de oferta selada.

Leilões de ofertas ascendentes são os leilões clássicos conhecidos. Os participantes dão ofertas ascendentes de preço até que reste apenas um participante disposto a pagar o valor ofertado. Este participante restante, idealmente, é o agente disposto a pagar o maior valor pelo produto, maximizando o lucro do vendedor. Estes leilões também são chamados de leilões ingleses ou leilões do modo inglês (Klemperer, 1999).

Leilões de ofertas descendentes funcionam de maneira similar ao leilão de oferta ascendente, com a diferença que as ofertas para o produto começam em um preço máximo e, com o passar do tempo, são gradualmente reduzidos até um potencial comprador aceitar pagar o preço pedido. Estes leilões são conhecidos como leilões do tipo holandês por causa da sua extensa utilização no mercado holandês de flores (Klemperer, 1999).

No mercado de oferta selada, ambos os leilões funcionam de forma similar. Precisamente, os agentes dão sua oferta de maneira selada (secreta) e, em sua abertura, o

agente que deu a maior oferta ganha o direito de comprar o bem. A diferença entre as duas é apenas referente ao valor pago: Em leilões de primeira oferta selada, o valor pago é o valor ofertado pelo comprador que obteve o direito de compra, enquanto nos leilões de segunda oferta selada o valor pago pelo comprador é igual à segunda maior oferta dada pelo item (Klemperer, 1999).

Leilões conhecidos como leilões duplos funcionam de maneira similar aos leilões ascendentes e descendentes, porém, compradores e vendedores ofertam seus preços e estes são ordenados. Quando um comprador e um vendedor acertam um preço (ofertam o mesmo valor), ocorre um negócio e o produto em questão é vendido ao comprador. Leilões duplos em que os agentes participantes do leilão ofertam preços de compra e venda em tempo real durante todo o funcionamento do leilão são chamados leilões duplos contínuos. Leilões duplos são negociados em bolsas de valores por causa da sua simplicidade operacional, eficiência e capacidade de se adaptarem rapidamente a mudanças (Gjerstad; Dickhaut, 1998).

Mercados de leilões duplos também têm alta eficiência alocativa (ganhos reais relativos aos ganhos potenciais), estando próximo de 100% (Gode; Sunder, 1997). Pela sua característica de ser descentralizado, mesmo quando observam-se casos de choques de oferta e/ou demanda ocorrem, leilões duplos funcionam de forma eficiente para atingir rapidamente e efetivamente um novo equilíbrio. Pelo mesmo motivo, leilões duplos possuem uma estrutura robusta e sólida, reduzindo impactos econômicos (Vytelingum; Cliff; Jennings, 2008).

Leilões duplos vêm sendo utilizados para explicar negociações de produtos usados pela internet (Özer, 2019); utilização de capacidade computacional em nuvem (Patel *et al.*, 2021); gerenciamento de recursos de *mobile edge computing* (LI *et al.*, 2020); e alocação de banda de internet (Naveen; Sundaresan, 2021) e para o mercado de compra e venda de eletricidade (Wu; Wu, 2020).

Naveen e Sundaresan (2021) consideram a relação entre consumidores de sistemas computacionais em nuvem e seus provedores como similar a um leilão duplo no qual o objetivo seria a maximização da utilidade fornecida pela infraestrutura existente. Quando considerada desta maneira, os autores propõem um modelo de leilão duplo para a alocação mais eficiente dos recursos, dadas as demandas computacionais dos usuários.

Por sua vez, Wu e Wu (2020) utilizam o modelo de leilão duplo para explicar o funcionamento de mercados de compra e venda de eletricidade nos Estados Unidos. Segundo os autores, o mercado norte-americano, mesmo dividido em dois grandes grupos de negociações – DA (*day-ahead*) e RT (*real-time*) – operam como um único mercado de leilões, onde os efeitos observados no mercado afetam as previsões do mercado. Ademais, os autores utilizam o equilíbrio geral walrasiano e conceitos de loterias para encontrar o resultado de que, no caso do mercado americano, o que se observa empiricamente é um mercado com alguns compradores e vendedores que monopolizam o mercado, o que afeta o equilíbrio considerado ideal de mercado.

2.2 Modelagem Baseada em Agentes

A modelagem baseada em agentes tem ganhado destaque no cenário econômico nos últimos 20 anos (Marin; Fernandez; De Vasconcelos, 2020), impulsionando uma série de estudos que adotam essa abordagem. Bonabeau (2002) descreve essa modelagem mais como uma mentalidade para abordar problemas do que como uma técnica específica. Isso se deve à forma particular de definição do problema, que exige a descrição do estado inicial dos agentes e de como eles percebem e interagem com o ambiente ao seu redor. O principal benefício dessa modelagem, em comparação com outras técnicas, é sua capacidade de capturar fenômenos emergentes, proporcionando uma descrição natural dos processos envolvidos e uma grande flexibilidade metodológica.

Quando aplicada à Economia, essa abordagem recebe o nome de Agent-Based Computational Economics (ACE), denominação criada por Leigh Tesfatsion em 1996 para diferenciar a utilização de modelos baseados em agentes dentro da Economia de aplicações em outras áreas (Tsfatsion, 2021). Com o tempo, a ACE desenvolveu características próprias, orientando os trabalhos econômicos conforme princípios específicos.

Tsfatsion (2017, 2021) apresenta sete princípios fundamentais para uma modelagem baseada em agentes na Economia, a saber: i) **Definição de Agente**: entidade existente em um ambiente virtual, capaz de agir com base em seu próprio estado; ii) **Escopo do Agente**: representação de indivíduos, grupos, instituições, entidades biológicas ou físicas; iii) **Construtividade Local**: a ação do agente em um instante depende de seu estado naquele momento; iv) **Autonomia do Agente**: as interações entre agentes não podem ser impostas externamente de forma a restringir flutuações; v) **Construtividade do Sistema**: o estado do sistema em qualquer instante

decorre da interação entre os agentes presentes; vi) **Historicidade do Sistema**: qualquer alteração ocorre apenas por meio das ações e interações dos agentes; por fim, vii) **Modelo como "meio de cultura"**: o modelador define as condições iniciais e, a partir de então, apenas observa a evolução do sistema.

Coletivamente, esses princípios consolidam a ideia de que um modelo baseado em agentes funciona como um laboratório computacional, permitindo a experimentação de políticas econômicas de forma análoga aos experimentos biológicos em placas de Petri (Teshatsion, 2017).

Esse método é particularmente útil em contextos onde o comportamento individual é complexo e as ações dos agentes exibem características estocásticas (BONABEAU, 2002). Essas características são observadas, por exemplo, nos mercados financeiros, no qual a interação entre agentes pode ser melhor compreendida a partir de uma perspectiva *bottom-up*, especialmente quando associada a teorias de finanças comportamentais. Essas teorias sugerem que indivíduos tomam decisões visando à satisfação pessoal, em vez de simplesmente maximizar sua utilidade (Olsen, 1998).

A teoria financeira clássica está fortemente vinculada à hipótese dos mercados eficientes (Van Den Bergh *et al.*, 2002), que assume que os participantes do mercado tomam decisões racionais para maximizar sua utilidade e que os mercados não possuem dinâmicas internas. Contudo, essa hipótese é idealizada, pois evidências empíricas indicam que os mercados apresentam dinâmicas internas (Van Den Bergh *et al.*, 2002). Além disso, a hipótese de eficiência de mercado não captura plenamente a complexidade do comportamento humano, como a racionalidade limitada.

Uma alternativa proposta foi considerar a eficiência do mercado de forma limitada (Farmer; Lo, 1999), comparando a eficiência de um mercado com outra referência similar, método comum em áreas como a física, sendo máquinas comparadas em termos de conversão de energia em trabalho útil. O desejo de construir modelos mais preditivos levou ao desenvolvimento de novas abordagens, incluindo aquelas que focam nos processos psicológicos de tomada de decisão dos agentes. Para esses casos, os modelos baseados em agentes são particularmente adequados.

Aplicações da modelagem baseada em agentes podem ser encontradas em diversas áreas, incluindo formação de expectativas (Almeida; Silveira, 2017), mercados consumidores de água para irrigação agrícola (Aghaie; Alizadeh; Afshar, 2020), inovação

e aprendizado (Almeida *et al.*, 2019), teoria dos jogos evolucionária (Almeida; Chacha, 2014) e difusão de novas tecnologias durante a pandemia da Covid-19 (Giovanini; Almeida, 2020).

Precisamente, Almeida e Silveira (2017) avaliam a evolução da distribuição de escolha de preditores de inflação considerando custos heterogêneos de formação de expectativas. Os resultados corroboram a teoria de Brock e Hommes (1997) sobre a escolha dinâmica de preditores com menor custo. Aghaie, Alizadeh e Afshar (2020) utilizam a modelagem baseada em agentes para analisar o consumo de água e os ganhos econômicos em diferentes tipos de leilões, os autores concluem que leilões duplos com preços discriminatórios são os mais eficientes econômica e hidrológicamente.

Por sua vez, Almeida *et al.* (2019) modelam o comportamento de firmas dos setores têxtil e de máquinas em relação ao incentivo à inovação. Os resultados indicam que firmas têxteis priorizam esforços internos, enquanto firmas do setor de máquinas investem mais em aprendizado externo. Almeida e Chacha (2014) utilizaram a modelagem baseada em agentes para testar quais estratégias podem ser consideradas evolucionariamente estáveis em diversos cenários. Os autores salientam que estratégias cooperativas, que punem ou excluem agentes mutantes são mais estáveis.

Por fim, Giovanini e Almeida (2020) analisam os impactos do isolamento social na adoção de plataformas de delivery durante a pandemia da Covid-19. Os autores afirmam que pequenos choques não foram suficientes para impulsionar o crescimento das plataformas, sendo necessária uma persistência maior das políticas de isolamento. Neste contexto, observa-se que a modelagem baseada em agentes continua a expandir sua aplicação na Economia e em outras áreas, demonstrando sua eficácia na análise de sistemas complexos e dinâmicos.

3. Modelo e Implementação Computacional

3.1 Algumas Considerações Iniciais

Eric Bonabeau (2002) explica que modelagem baseada em agentes é mais uma mentalidade do que uma tecnologia. Assim, o autor discorre que esta metodologia é uma forma de raciocinar o problema como um resultado da interação entre agentes que procuram cumprir com seus próprios objetivos individuais, ao invés de agir seguindo uma fórmula geral. Ademais, Bonabeau (2002) divide a aplicação desta metodologia em quatro áreas, a saber: i) **Fluxos**: evacuação; tráfego; gerenciamento de fluxo de clientes; ii)

Mercados: mercados de ações; robôs de compra e *software agents*; simulação estratégica; iii) **Organizações:** risco operacional; design de organizações; e iv) **Difusão:** difusão da inovação; dinâmicas de adoção

O presente trabalho, o foco será a área de mercados, mas deve-se reforçar que o modelo pode, com um pouco de adaptação, servir como base para qualquer uma das outras áreas. O funcionamento do modelo se dá pela interação dos agentes em um mercado computacional de leilão duplo, no qual estes agentes compram e vendem produtos. Para decidir como agir, os agentes olham para sua expectativa de preço (preço pelo qual os agentes estão dispostos a comprar/vender) para o produto, para as expectativas de preços dos vendedores de produtos, para sua utilidade atual e para a sua utilidade com o produto adicional. Desta maneira, se o agente valoriza o produto igual ou acima do preço dos vendedores no mercado e sua utilidade com o produto adicional é maior do que sua utilidade no momento atual, o agente decide comprar um produto. Se o seu preço atribuído ao produto for menor do que o preço atribuído pelos vendedores do produto no mercado, a negociação não é efetuada e nada acontece.

Caso não haja comprador no mercado (todos os agentes desejam vender produto), todos os agentes têm sua expectativa de preço reduzida em 1 unidade, pois não há compradores no mercado. Caso não haja nenhum agente desejando vender produtos, todos os agentes aumentam sua expectativa de preço em 1 unidade e, em último caso, caso o agente não consiga, por qualquer motivo, comprar(vender) um produto por um longo período de tempo, o agente tem sua expectativa de preço ajustada em uma unidade para mais (menos)

Após uma rodada de negociações, todos os agentes ajustam suas expectativas de preços de acordo as regras listadas anteriormente. Além disso, todos os agentes possuem as mesmas características no período inicial, precisamente: preço pelo qual o agente está disposto a comprar/vender o produto; Quantidade de produtos que o agente possui; Status do agente (B quando o agente é um comprador e S quando o agente é vendedor); Utilidade do agente, baseada na quantidade de produto e dinheiro que ele possui.

Posteriormente, nas demais rodadas de interação, todos os agentes buscam maximizar sua utilidade. Esta é dada de acordo com a seguinte fórmula:

$$Utilidade = ((QProd \times PProd)^{(1/2)} \times (QDin)^{(1/2)}), \quad (1)$$

no qual QProd é a quantidade de produtos; PProd é expectativa de Preço; QDin é dinheiro em posse do agente. Os expoentes $1/2$ indicam que o agente dá pesos iguais para ações e para dinheiro.

Ademais, a quantidade de produtos é finita e limitada à soma das quantidades possuídas por cada agente na iniciação do modelo. A quantidade de produtos por agentes é um valor randômico entre 100 e 300. A expectativa de preço no período inicial é um valor aleatório entre 10 e 100. O dinheiro inicial é um valor aleatório entre 5000 e 10000 unidades. A quantidade de períodos na simulação foi definida em 2000. Por fim, o número de agentes foi definido em 1000. Todas as configurações iniciais de parâmetros são realizadas de modo a testar o comportamento do modelo e posteriormente, fazer os testes de robustez.

3.2 Funcionamento do Código

Diante das condições iniciais, o próximo passo é definir as características dos agentes, a saber: i) Id – número (inteiro) único para cada agente, facilitando a identificação de cada agente pertencente ao sistema; ii) Qtde – quantidade de produtos que o agente possui. Este número será obrigatoriamente um número inteiro; iii) Cash – Quantidade de dinheiro que o agente tem. Inicialmente, definida como 1000; iv) Preço – Valor pelo qual o agente está disposto a comprar/vender produto; v) Util – Utilidade do agente; vi) Status – Status do agente, assim, B quando o agente quiser comprar produto (*buyer*), S quando o agente quiser vender produto (*seller*); vii) Sold – Indica se o agente já vendeu um produto nesta rodada de compras (*true*) ou não (*false*); viii) Runs – variável para controlar a quantidade de rodadas que o agente não fechou nenhum negócio e determinará se o agente decide aumentar o preço que ele está disposto a pagar ou diminuir o preço pelo qual está disposto a vender.

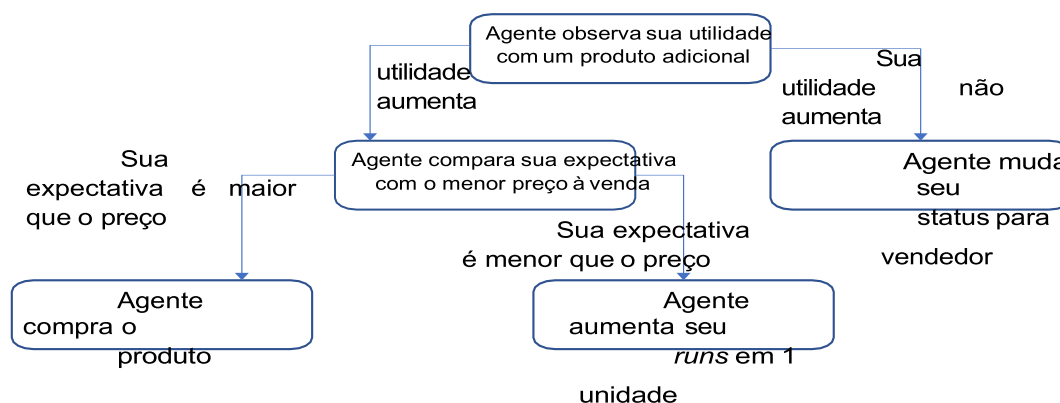
Na sequência, foram criadas duas funções, a saber: uma para obter os vendedores de determinado momento e outra, para obter os compradores. As duas funcionam de maneira similar, sinalizando apenas em qual tipo de agente é obtido (compradores vs vendedores) e, no caso dos agentes vendedores, os agentes que já fizeram uma venda na rodada (*sold = true*) não são alocados nesta lista.

Para o cálculo de utilidade com a compra de um produto, é criada uma função que, dado um agente, obtêm-se a utilidade atual e a utilidade que o agente teria com a compra

de uma nova unidade de produto. Caso o resultado seja positivo (há aumento da utilidade percebida pelo agente), a função retorna *true*. Em caso negativo, a função retorna *false*.

Posteriormente, é definida a função de movimento do agente. Em cada movimento, o agente primeiro observa se há vendedores no mercado. Em caso negativo, ele ajusta sua expectativa de acordo com a regra definida que será apresentada posteriormente. Caso haja vendedores, o agente age de acordo com seu *status*. A Figura 1 apresenta o comportamento caso o agente seja comprador.

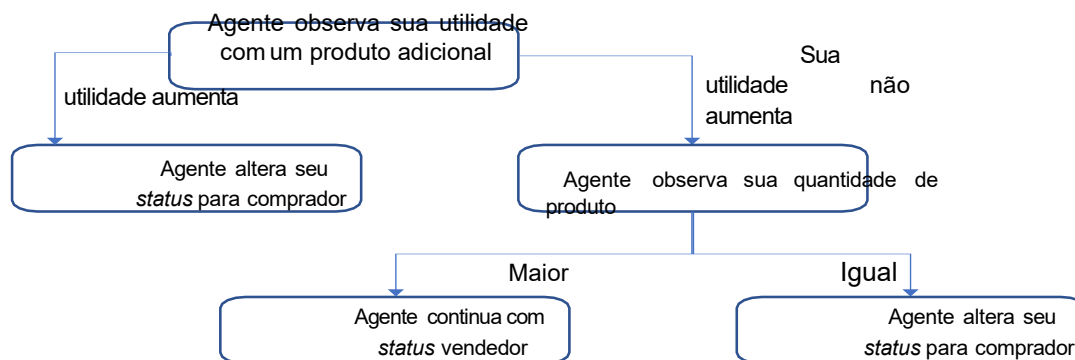
Figura 1 – Árvore decisória para agentes com status comprador



Fonte: Elaboração Própria

Assim, caso o agente possua expectativa de preço maior do que o agente vendedor, o agente compra o produto, pelo valor pedido do vendedor. Contudo, caso a utilidade do agente comprador seja menor do que a utilidade atual, o agente passa a ser um vendedor. A Figura 2 apresenta o comportamento, caso o agente seja vendedor:

Figura 2 – Árvore Decisória para agentes com status vendedor

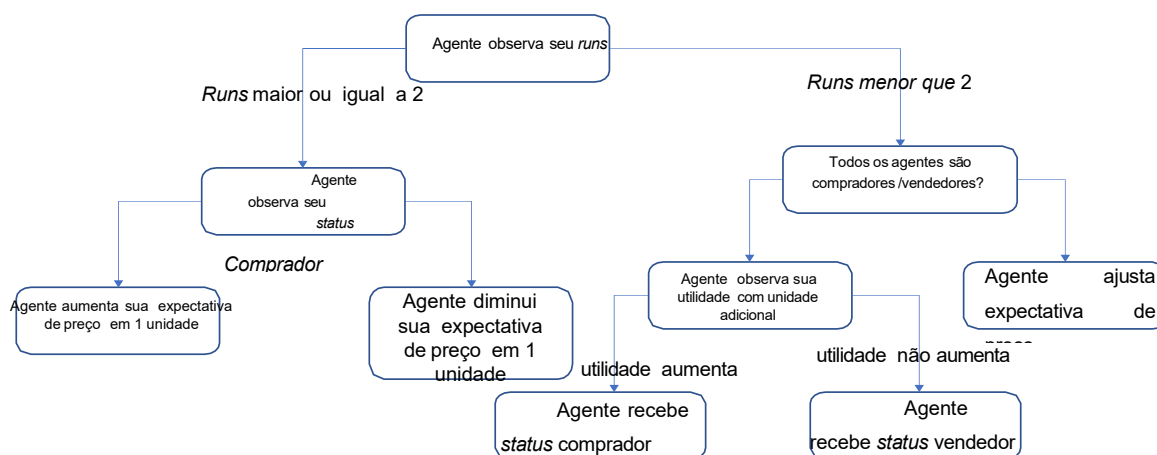


Fonte: Elaboração Própria

Ao observar a Figura 3, verifica-se que caso a utilidade do agente com um produto adicional (a valor de mercado) seja maior do que a utilidade atual, seu status é alterado para comprador. No entanto, se a nova utilidade não aumentar, o agente continua com o status de vendedor, a não ser que sua quantidade de produto seja zero, situação na qual ele torna-se comprador.

A função de ajuste de preços funciona da seguinte maneira: O agente observa o seu valor *runs*. Caso este valor seja igual ou maior a 2, o agente ajusta seu preço de acordo com seu *status*. Precisamente, se o agente for vendedor, ele diminui sua expectativa de preço em uma unidade. Por sua vez, se o agente for comprador, ele aumenta sua expectativa de preço em uma unidade. Caso o agente tenha valor de *runs* menor que 2, o agente verifica o mercado e vê se todos os agentes são compradores ou vendedores. Se esta situação for verdadeira, o agente observa sua utilidade com uma unidade adicional. Caso sua utilidade aumente, o agente torna-se comprador. Caso não aumente, o agente torna-se vendedor. Em casos em que há compradores e vendedores no mercado, o agente decide ajustar seu preço. Assim, os agentes podem novamente vender produtos no mercado (*sold = false*). Posteriormente, após todos os agentes fazerem seu movimento, o modelo como um todo é atualizado.

Figura 3 – Árvore de decisão para ajuste de preço dos agentes



Fonte: Elaboração Própria

4.Resultados

4.1 Resultados Iniciais

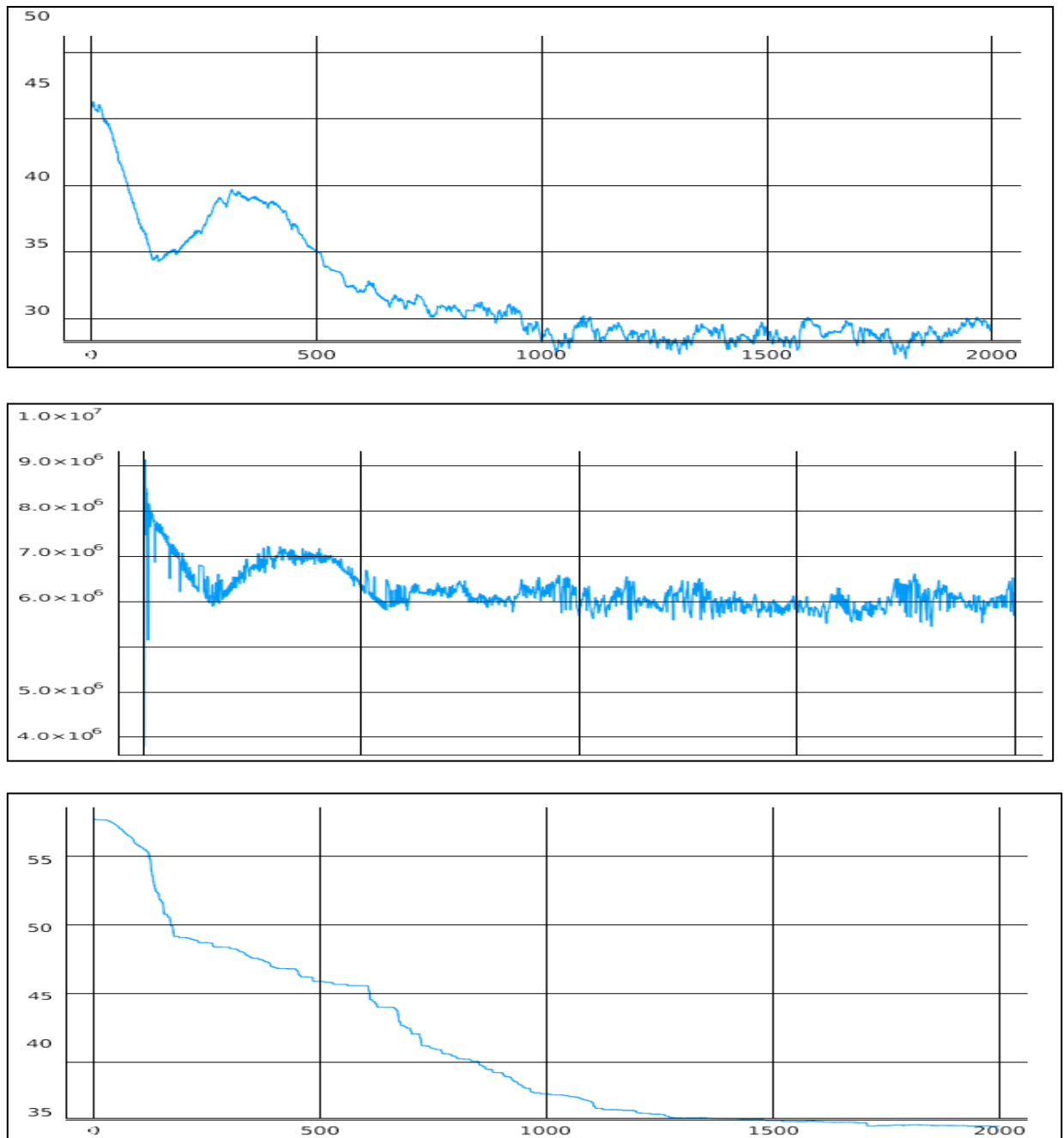
Conforme informado na Seção 3.1, a quantidade de produtos por agentes foi definida como um valor aleatório entre 100 e 300. A expectativa de preço no período inicial é um valor aleatório entre 10 e 100. A quantidade inicial de dinheiro é um valor aleatório entre 5.000 e 10.000 unidades. A quantidade de períodos na simulação foi definida em 2.000. O número de agentes foi definido em 1000. Neste contexto, a Figura 4 mostra a evolução do preço médio do produto no decorrer dos períodos.

Ao visualizar a Figura 4a, observa-se que o preço médio atinge um equilíbrio dinâmico a partir do período 1.000 e, então, mantém-se esse equilíbrio. Este resultado aponta que a expectativa de preço oscila em torno de um valor médio no longo prazo. Por sua vez, a Figura 4b apresenta a utilidade total, que é a soma das utilidades de todos os agentes. Assim, identifica-se que o sistema atinge um equilíbrio dinâmico. Este equilíbrio ocorre e, assim que é atingido, em torno do período 550, mantém-se consistente durante os períodos subsequentes.

Em suma, o somatório da utilidade de todos os agentes do sistema apresenta, comportamento similar ao comportamento das expectativas de preços dos agentes, por ser um valor dependente das mesmas. Ao contrário do comportamento dos preços, que possuem uma queda maior entre os preços nos primeiros períodos quando comparados aos períodos mais à frente, o somatório das utilidades de todos os agentes apresenta um equilíbrio que é atingido mais rapidamente. Este resultado sugere que os agentes estão atingindo uma situação ótima no sentido de Pareto e mantendo-se nesta situação nos períodos subsequentes.

O desvio padrão das quantidades de produto dos agentes é mostrado na Figura 4c. Precisamente, a figura sinaliza que o desvio padrão da quantidade de produtos dos agentes vai diminuindo, indicando que as quantidades de produtos dos agentes vão se tornando iguais. Este resultado sugere que no longo prazo, ocorre uma melhor distribuição dos produtos, e as trocas são cada vez menores (converge para um equilíbrio de Pareto).

Figura 4 – a) Expectativa de preço médio por período, b) Soma da utilidade dos agentes por período e c) Desvio padrão da quantidade de produto dos agentes por período



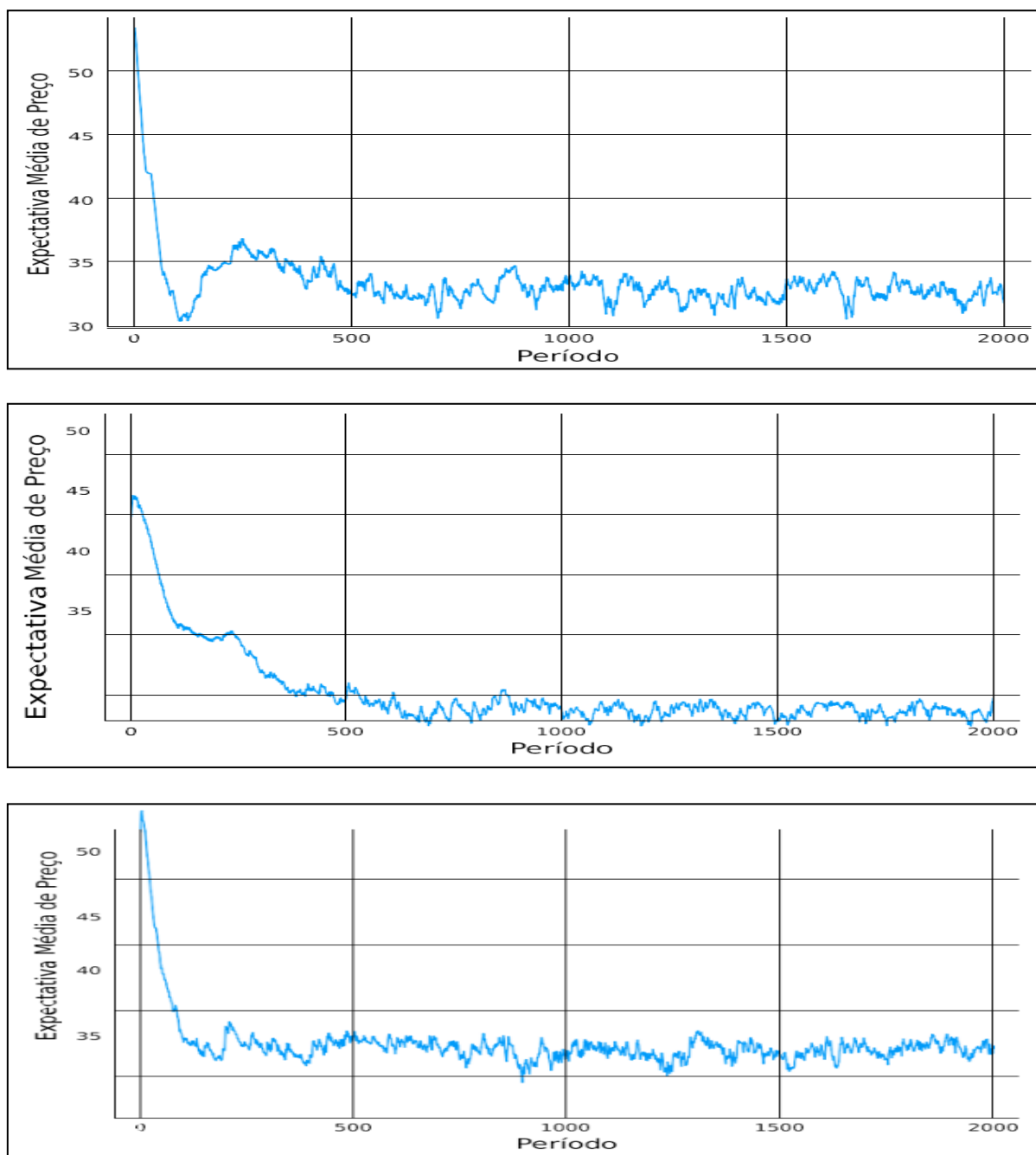
Fonte: Elaboração Própria

4.2 Testes

4.2.1 Alteração do Número de Agentes

O primeiro teste realizado é alteração do número de agentes. Assim, para analisar o impacto da alteração do número de agentes, considera-se 50, 100 e 500 agentes em processo de interação no modelo. A Figura 5a apresenta a expectativa de preço média dos agentes do modelo quando o modelo possui 500 agentes.

Figura 5 – a) Expectativa de preço médio com $n=500$, b) $n=100$ agentes e c) $n=50$ agentes



Fonte: Elaboração Própria

Com a redução da quantidade de agentes para 500, a expectativa média de preço comporta-se de forma similar ao observado com 1.000 agentes. Desta forma, o modelo exibe um equilíbrio dinâmico que, a partir de então, mantém-se na faixa entre 37 e 33 unidades monetárias. Por sua vez, a Figura 5b apresenta a expectativa de preço quando o modelo é iniciado com 100 agentes.

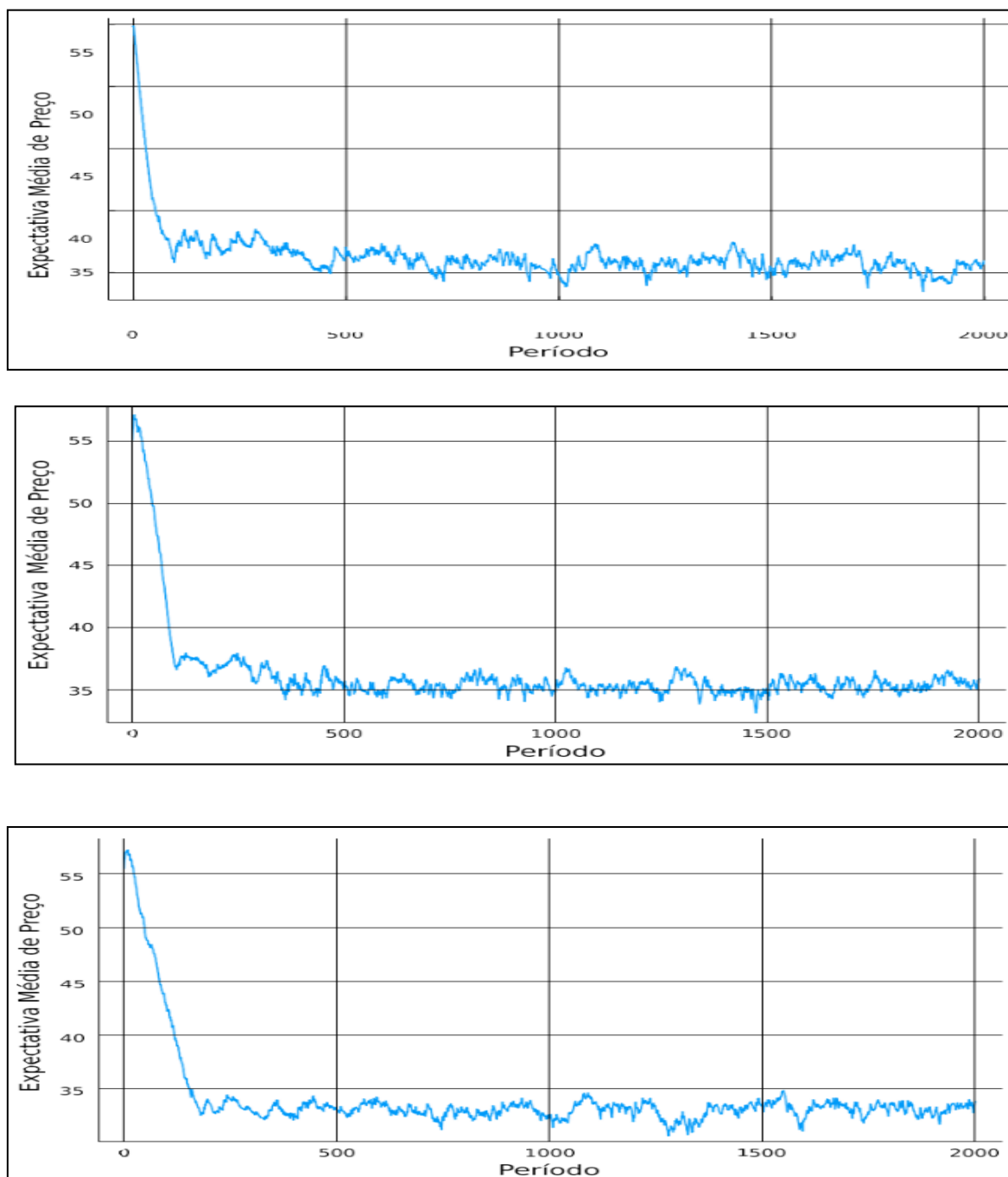
Os preços comportam-se de maneira similar ao observado anteriormente, No entanto, com uma diminuição na quantidade de agentes presentes no modelo, observa-se um período de tempo maior para atingir o equilíbrio. Por fim, com 50 agentes, observa-se a continuidade do comportamento observado anteriormente, conforme mostra a Figura 5c. Ao contrário do observado com 100 agentes, o equilíbrio é atingido rapidamente de maneira similar ao que ocorreu com 500 agentes. O nível de preços continua o mesmo e parece haver a mesma variabilidade nos preços com todos os parâmetros. Em suma, os resultados encontrados sinalizam que o comportamento do sistema não é afetado de forma relevante pela redução do número de agentes.

4.2.2 Alteração da Expectativa de Preço

Em função do tempo demandado para a execução do modelo com 1.000 e 500 agentes, e considerando que a redução do número de agentes não alterou o comportamento do sistema, opta-se por considerar 100 agentes para analisar a influência de alteração na expectativa inicial de preço nos resultados do modelo. Assim, altera-se a expectativa inicial para um valor aleatório entre 50 e 60 e, depois, entre 30 e 80.

A Figura 6a apresenta a progressão quando a expectativa de preço dos agentes inicia em um valor aleatório entre 50 e 60. Conforme mostrado na Figura 6b, o comportamento dos agentes mantém-se o mesmo quando inicializado com a expectativa de preço entre 10 e 100. Por sua vez, a Figura 6c também aponta que o a expectativa de preço se mantém inalterada quando a expectativa de preço inicial pode variar entre 30 e 80. Assim, o preço se mantém próximo a 35 unidades, com uma pequena variação. Os resultados obtidos nestes testes, apontam que a alteração da expectativa de preço inicial não ocasiona grandes mudanças nas propriedades do modelo.

Figura 6 – a) Expectativa de preço médio com valor entre 50 e 60, b) entre 10 e 100 e c) entre 30 e 80



Fonte: Elaboração Própria

4.2.3 Alteração da Quantidade Inicial de Produtos

Para analisar o impacto da alteração da quantidade inicial de produtos nos resultados do sistema, realizam-se duas rodadas considerando-se valor aleatório entre 150 e 250 na primeira e um valor fixado em 200 na segunda execução. A Figura 6a apresenta a evolução da expectativa média de preço considerando-se o valor aleatório

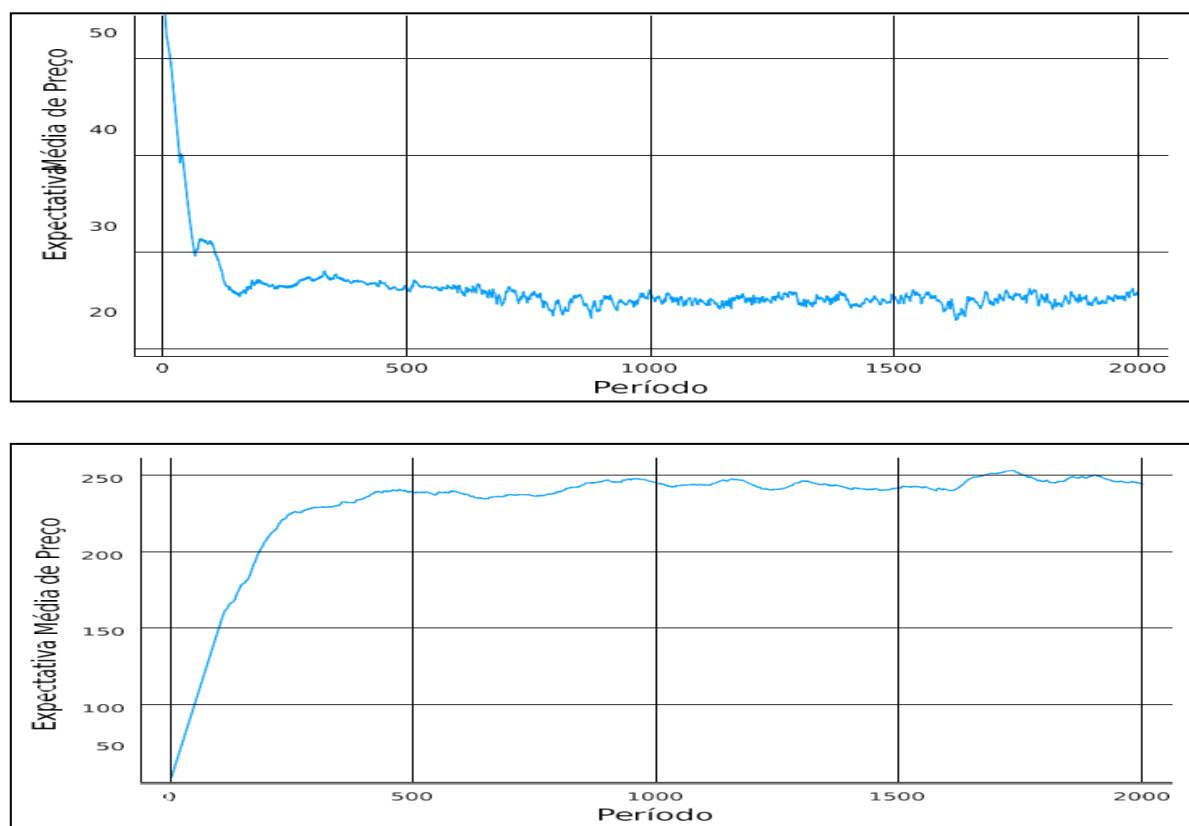
entre 150 e 250 produtos iniciais. Conforme observado na Figura 6b, o comportamento do modelo para quantidade inicial de 150 a 250 continua similar àquele observado com a quantidade inicial de produto definida entre 100 e 300. Desta maneira, o modelo atinge o equilíbrio dinâmico e mantém-se entre 37 e 33 unidades durante a execução. Pelo período observado, uma vez atingido o equilíbrio, este se mantém durante todos os períodos subsequentes.

A Figura 6c apresenta o comportamento da expectativa de preço média dos agentes do modelo quando a quantidade inicial de produto é definida em 200 unidades. O comportamento observado é consistente com as alterações feitas na quantidade inicial de produto, com uma pequena redução no preço de equilíbrio dos agentes. Portanto, os resultados obtidos mostram que não houve alteração relevante no comportamento dos agentes.

4.2.4 Alteração da Quantidade de Dinheiro

A Figura 7a mostra o comportamento do modelo quando o dinheiro inicial é definido em 5000 unidades. Conforme observado, a expectativa de preço média caminha rapidamente para um nível próximo de 25 unidades e mantém-se em torno deste nível pelos períodos subsequentes. O comportamento observado é consistente com o modelo iniciado com valores aleatórios entre 5.000 e 10.000 unidades de dinheiro, entretanto, o equilíbrio com 5.000 unidades de dinheiro por agente está em um nível de preços inferior ao observado quando o modelo é iniciado com um valor aleatório entre 5.000 e 10.000 unidades de dinheiro.

Figura 7 – a) Expectativa de preço médio com dinheiro inicial igual à 5000 e b) 50000



Fonte: Elaboração Própria

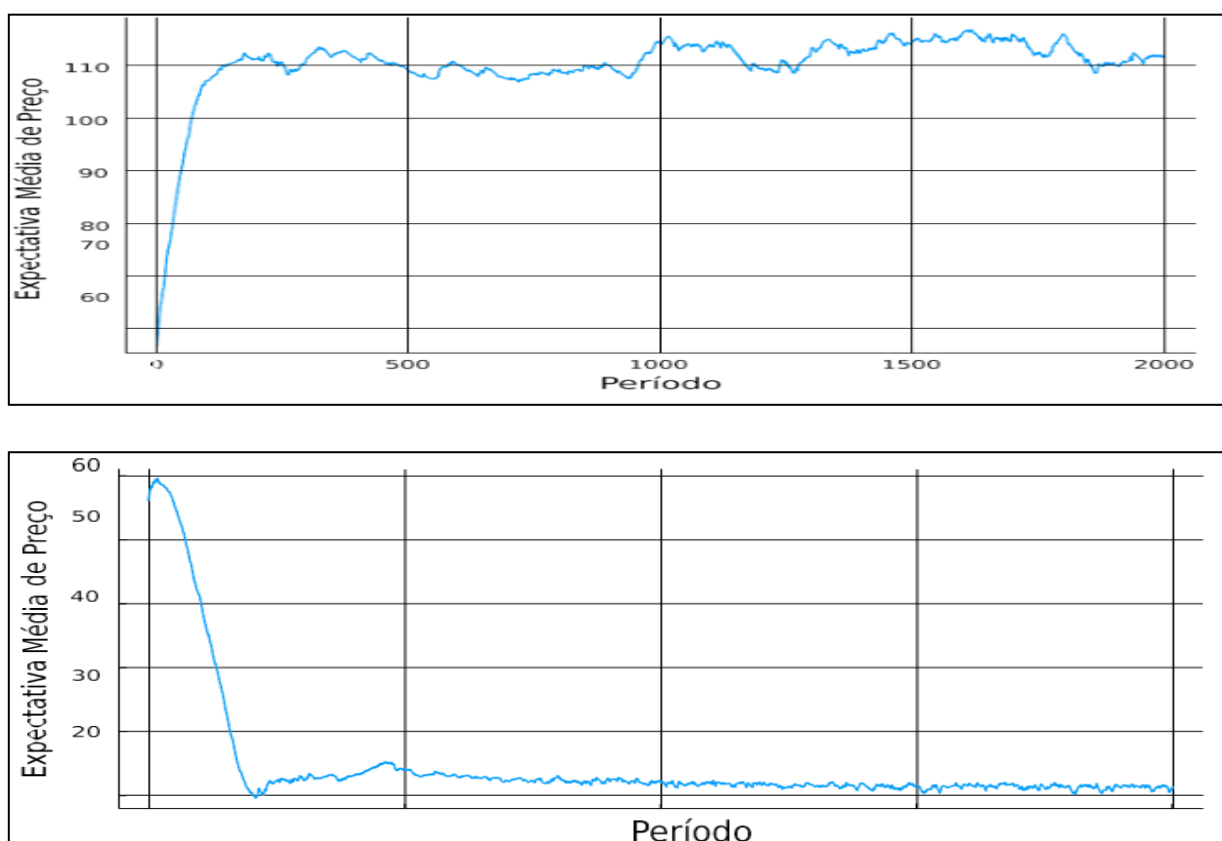
A Figura 7b mostra o comportamento do modelo quando este é iniciado com dinheiro definido em 50.000 unidades. Conforme observado, o comportamento atinge um equilíbrio em torno de 250 unidades de preço por produto e se mantém neste nível pelos períodos subseqüente. O resultado difere do observado em testes anteriores, mas, assim como nos referidos testes, também atinge um equilíbrio dinâmico. Os resultados sinalizam que uma alteração na quantidade total de dinheiro dos agentes influencia o nível de preços do modelo. Resultado que é consistente com o esperado teoricamente.

4.2.5 Alteração nos Expoentes da Função Utilidade

Para funções Cobb-Douglas, os expoentes da função representam as elasticidades relativas do capital e do trabalho. De forma análoga, neste estudo, os

expoentes da função utilidade representam as importâncias relativas do produto (ação) e do dinheiro para o agente em questão. Se o agente possui 1/2 para produto e dinheiro, significa que o agente considera indiferente possuir seus bens em dinheiro ou ações, porém como o número de produto não é igual ao número de dinheiro, o valor destas ações é aumentado a fim de igualar o valor do dinheiro. Para investigar o efeito de uma alteração nos expoentes, realizaram-se duas análises, alterando os valores para simular preferência dos agentes por dinheiro ou produto. A Figura 8a mostra a expectativa de preço média quando a função utilidade é utilizada com expoentes para produto e dinheiro 3/4 e 1/4, respectivamente.

Figura 8 – Expectativa de preço médio com expoente de ações igual à 3/4 e b) expoente de ações igual 1/4



Fonte: Elaboração Própria

Como pode ser observado, o comportamento dos agentes no modelo é consistente com a situação encontrada anteriormente. Contudo, o nível no qual o sistema encontra equilíbrio é diferente. Isto deve-se ao fato de, quando o expoente para ações na função utilidade é maior do que o expoente do dinheiro, os agentes preferem manter uma maior parte dos seus recursos em forma de produto. Sendo assim, o valor

dado pelos agentes para o produto é maior e, conseqüentemente, o preço pelo qual os agentes estariam dispostos a trocar ação por dinheiro (expectativa de preço dos agentes) é mais alto.

De forma análoga, a Figura 8a mostra a expectativa de preço média quando a função utilidade é utilizada com expoentes $1/4$ e $3/4$, respectivamente. Neste caso, os agentes dão mais valor a possuir seus recursos na forma de dinheiro e, por este motivo, valorizam as ações a um preço mais baixo do que no observado quando os expoentes eram iguais a $1/2$.

Com a alteração dos expoentes na função utilidade, é vista uma alteração no mesmo sentido no equilíbrio entre ações e seu preço. Caso o agente valorize mais seu dinheiro do que ações, os agentes estarão dispostos a vender suas ações mais barato para conseguir mais dinheiro e, conseqüentemente, fazem com que o preço das ações atinja um equilíbrio em um nível menor que o anterior. Da mesma forma, caso o agente valorize ação mais do que valoriza dinheiro, ele estará disposto a pagar um valor maior por cada ação e o equilíbrio se dará em um nível maior do que o nível em que o equilíbrio ocorre quando os dois valores são iguais.

5. Considerações Finais

Este estudo buscou avaliar o comportamento dos agentes em um mercado de leilão duplo por meio de uma modelagem baseada em agentes. A abordagem adotada permitiu analisar como os agentes interagem e ajustam suas estratégias ao longo do tempo, levando à convergência para um equilíbrio de preços. Uma vez atingido, esse equilíbrio se mantém ao longo dos períodos subsequentes, reforçando a robustez do modelo em replicar dinâmicas de mercado.

Além das contribuições teóricas, este estudo apresenta implicações significativas para a formulação de políticas públicas, especialmente no que se refere à regulação de mercados baseados em leilões, como os de energia, telecomunicações e licitações públicas. O modelo proposto oferece uma representação detalhada das interações entre agentes em um mercado de leilão duplo, capturando a dinâmica dos preços e permitindo a análise de como diferentes parâmetros e estruturas de mercado afetam os resultados de negociação.

Os resultados indicam que certos parâmetros, como o número de agentes no mercado, não impactam significativamente o comportamento emergente, enquanto outros, como os expoentes da função utilidade, exercem influência direta sobre as decisões dos agentes e o resultado final do mercado. Essa distinção tem implicações importantes tanto para a formulação de modelos econômicos quanto para o desenho de políticas públicas.

Ao simular o comportamento dos agentes e suas decisões de compra e venda ao longo do tempo, o modelo fornece insights valiosos para a avaliação e aprimoramento de mecanismos de leilão, contribuindo para o desenho de políticas mais eficientes. Por exemplo, os resultados podem orientar a regulação de leilões em mercados com características como assimetrias de informação, poder de mercado concentrado ou a presença de estratégias de manipulação de preços. Ao ajustar parâmetros como os incentivos econômicos ou as regras de participação, o modelo permite testar virtualmente os efeitos de intervenções regulatórias antes de sua implementação no mercado real.

Embora o modelo atual apresente resultados consistentes com a teoria econômica, trata-se de uma versão inicial com baixa complexidade e funcionamento simplificado. Para pesquisas futuras, sugere-se incorporar novas camadas de complexidade, como aprendizado adaptativo dos agentes, informações assimétricas e dinâmicas mais realistas de oferta e demanda. Essas extensões permitirão uma análise mais detalhada de como mercados descentralizados operam e respondem a choques externos, contribuindo tanto para o avanço da modelagem econômica quanto para a formulação de políticas públicas mais eficazes.

REFERÊNCIAS

- AGHAIE, V.; ALIZADEH, H.; AFSHAR, A. Agent-Based hydro-economic modelling for analysis of groundwater-based irrigation Water Market mechanisms. **Agricultural Water Management**, v. 234, p. 106140, 2020.
- ALMEIDA, H. F.; CHACHA, L. A. Dilema do Prisioneiro Iterado e Estratégia Evolucionariamente Estável: Uma Abordagem Econômica. **Revista de Economia**, v. 40, n. 1, p. 35–53, 2014.
- ALMEIDA, H. J. F.; GIOVANINI, A.; PEREIRA, W. M.; COELHO, A. R. A. Inovação e Aprendizado Em Um Ambiente De Racionalidade Limitada E Sujeito A Externalidades De Rede: Uma Abordagem De Escolha Discreta. **Análise Econômica**, v. 37, n. 73, 2019.
- ALMEIDA, H. J. F.; SILVEIRA, J. J. da. Formação De Expectativas De Inflação Em Um Ambiente De Racionalidade Limitada: Uma Abordagem De Escolha Discreta. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 47, n. 3, p. 465–486, 2017.
- BEZANSON, J.; CHEN, J.; CHUNG, B.; KARPINSKI, S.; SHAH, V. B.; VITEK, J.; ZOUBRITZKY, L. Julia: Dynamism and Performance Reconciled by Design. Proc. **ACM Program. Lang.**, New York, NY, USA, v. 2, n. OOPSLA, p. 120:1–120:23, 2018.
- BEZANSON, J.; EDELMAN, A.; KARPINSKI, S.; SHAH, V. B. Julia: A Fresh Approach To Numerical Computing. **Review**, v. 59, n. 1, p. 65–98, 2017.
- BONABEAU, E. Agent-Based Modeling: Methods And Techniques For Simulating Human Systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 99, n. suppl 3, p. 7280 LP – 7287, 2002.
- FARMER, J. D.; LO, A. W. Frontiers Of Finance: Evolution And Efficient Markets. **National Academy of Science**, 1999.
- GIOVANINI, A.; ALMEIDA, H. J. F. H. Isolamento Social Do Covid-19 E Suas Influências Para Consumidores, Restaurantes E Aplicativos: Uma Análise Com Modelo Baseado Em Agentes. **Revista Brasileira de Economia de Empresas**, 2021.
- GJERSTAD, S.; DICKHAUT, J. Price Formation In Double Auctions. **Games And Economic Behavior**, 525 B ST, STE 1900, SAN DIEGO, CA 92101-4495 USA, v. 22, n. 1, p. 1–29, 1998.
- GODE, D. K.; SUNDER, S. What Makes Markets Allocationally Efficient? **Quarterly Journal of Economics**, v. 112, n. 2, p. 603–630, 1997.
- HANS M. AMMAN. What is Computational Economics? **Computational Economics**, v. 10, 1997
- KLEMPERER, P. Auction Theory: A Guide To The Literature. **Journal of Economic Surveys**, v. 13, n. 3, p. 227–286, 1999.
- LI, Q.; YAO, H.; MAI, T.; JIANG, C.; ZHANG, Y. Reinforcement-Learning-and Belief-Learning-Based Double Auction Mechanism for Edge Computing Resource Allocation. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 7, p. 5976–5985, 2020.
- MARIN, S. R.; FERNANDEZ, B. P. M.; DE VASCONCELOS, D. S. Agent Based Models

And Complex Individuals: An Epistemological Analysis. **OEconomia**, v. 10, n. 2, p. 231–256, 2020.

MARIN, S. R.; FERNANDEZ, B. P. M. Rethinking Economic Methodology: Complexity, Agent-based models (ABMs) and Individuals. **XXI ENCONTRO DE ECONOMIA DA REGIÃO SUL**. 2018.

NAVEEN, K. P.; SUNDARESAN, R. Double-Auction Mechanisms for Resource Trading Markets. **IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING**, v. 29, n. 3, p. 1210–1223, 2021.

OLSEN, R. A. Behavioral Finance And Its Implications For Stock-Price Volatility. **Financial Analysts Journal**, v. 54, n. 2, p. 10–18, 1998.

ÖZER, A. H. A Double Auction Based Mathematical Market Model And Heuristics For Internet-Based Secondhand Durable Good Markets. **Computers & Operations Research**, v. 111, p. 116–129, 2019.

PATEL, Y. S.; MALWI, Z.; NIGHOJKAR, A.; MISRA, R. Truthful Online Double Auction Based Dynamic Resource Provisioning For Multi-Objective Trade-Offs In IaaS Clouds. **Cluster Computing**, 2021.

TESFATSION, L. Agent-Based Computational Economics: A Constructive Approach to Economic Theory: **Staff General Research Papers Archive**. [S. l.]: **Iowa State University, Department of Economics**, 2006.

TESFATSION, L. Agent-Based Computational Economics: Overview and Brief History. **Economics Working Papers**, 2021.

TESFATSION, L. Modeling Economic Systems As Locally-Constructive Sequential Games. **Journal of Economic Methodology**, v. 24, n. 4, p. 384–409, 2017.

VAN DEN BERGH, W. M.; BOER, K.; DE BRUIN, A.; KAYMAK, U.; SPRONK, J. On Intelligent-Agent Based Analysis Of Financial Markets. **Erasmus University Working Paper**, 2002.

VYTELINGUM, P.; CLIFF, D.; JENNINGS, N. R. Strategic Bidding In Continuous Double Auctions. **Artificial Intelligence**, v. 172, n. 14, p. 1700–1729, 2008.

WU, J.; WU, C. On the Double Auction Mechanism Design for Electricity Market. In: **IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids**, 2020.

ZAPPA NARDELLI, F.; BELYAKOVA, J.; PELENITSYN, A.; CHUNG, B.; BEZANSON, J.; VITEK, J. Julia Subtyping: A Rational Reconstruction. **Proc. ACM Program. Lang.**, New York, NY, USA, v. 2, n. OOPSLA, p. 113:1–113:27, 2018

NOTAS

Endereço de correspondência do principal autor

Centro Socio Econômico, Florianópolis, SC, Brasil.

AGRADECIMENTOS

Não se aplica

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Concepção e elaboração do manuscrito: Bornia, L. G. Almeida, H. J. F. Giovanini, A. Nunes, M. S.

Coleta de dados: Bornia, L. G. Almeida, H. J. F. Giovanini, A. Nunes, M. S.

Análise de dados: Bornia, L. G. Almeida, H. J. F. Giovanini, A. Nunes, M. S.

Discussão dos resultados: Bornia, L. G. Almeida, H. J. F. Giovanini, A. Nunes, M. S.

Revisão e aprovação: Bornia, L. G. Almeida, H. J. F. Giovanini, A. Nunes, M. S.

FINANCIAMENTO

Não se aplica

CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica

APROVAÇÃO DE COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica

CONFLITO DE INTERESSES

Não há conflitos de interesse

LICENÇA DE USO

Os autores cedem à **Textos de Economia** os direitos exclusivos de primeira publicação, com o trabalho simultaneamente licenciado sob a [Licença Creative Commons Attribution Non-Comercial ShareAlike](#) (CC BY-NC SA) 4.0 International. Esta licença permite que **terceiros** remixem, adaptem e criem a partir do trabalho publicado, desde que para fins **não comerciais**, atribuindo o devido crédito de autoria e publicação inicial neste periódico desde que adotem a mesma licença, **compartilhar igual**. Os **autores** têm autorização para assumir contratos adicionais separadamente, para distribuição não exclusiva da versão do trabalho publicada neste periódico (ex.: publicar em repositório institucional, em site pessoal, publicar uma tradução, ou como capítulo de livro), com reconhecimento de autoria e publicação inicial neste periódico, desde que para fins **não comerciais e compartilhar com a mesma licença**.

PUBLISHER

Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Educação Física. LaboMídia - Laboratório e Observatório da Mídia Esportiva. Publicado no [Portal de Periódicos UFSC](#). As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

EDITORES

Marcelo Arend

Ronivaldo Steingraber